[UCI]I804:24011-200000231829

2007년 2월

석사학위신청논문

# 자동차용 고강도 강판의 Nd:YAG 레이저 Stitch 용접에 관한 연구

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY
100374141 2007-04-09

조선대학교대학원

선박해양공학과

추 재 선

# 자동차용 고강도 강판의 Nd:YAG 레이저 Stitch 용접에 관한 연구

A study on the stitch welding by using Nd:YAG laser of high strength steel sheet in automobile

2007 년 2 월 일

조선대학교대학원

선박해양공학과

추 재 선

# 자동차용 고강도 강판의 Nd:YAG 레이저 Stitch 용접에 관한 연구

지도교수 방 한 서

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로

제출함.

2006 년 10 월 일

조선대학교대학원

선박해양공학과

추 재 선

# 추재선의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 방희선 (인)

위 원 조선대학교 교수 방한서 (인)

위 원 조선대학교 교수 윤덕영 (인)

2006 년 11 월 일

조선대학교 대학원

# 목 차

Abstract ---------- 1
제 1 장 서론 ---------- 3
1. 1 연구배경 및 목적 ---------- 3

제 2 장 열전도 해석 ---------- 4
2. 1 해석 이론 ---------- 4
2. 2 수치해석 조건 ---------- 8
2. 3 해석 모델 및 용접조건 ---------- 9
2. 3. 1 저항 점용접 및 레이저용접(2차원 해석) ------- 9
2. 3. 1 저항 단점용접 ---------- 10
2. 4 저항 다점용접 ---------- 12
2. 5 레이저용접 ---------- 13
2. 6 레이저 STITCH 용접 ---------- 14
2. 7 열분포 특성 ---------- 15

제 3 장 용접잔류응력 해석 ---------- 24
3. 1 해석이론 ---------- 24
3. 1. 1 전변형률 관계식 ---------- 24
3. 1. 2 절점력과 절점변위의 관계 ---------- 24
3. 1. 3 응력-변형률 관계식 ---------- 25
3. 1. 4 탄성역에서의 응력-변형 관계식 ---------- 26
3. 1. 5 소성역에서의 응력-변형 관계식 ---------- 27
3. 2 해석 모델 및 해석방법 ---------- 29
3. 3 경계조건 ---------- 30
3. 4 용접잔류응력 분포 특성 ---------- 31

제 4 장 실 험 ---------- 35

4.1 실험 방법 ---------- 35
4.2 저항 단점용접 ---------- 37
4.3 Nd:YAG 레이저 용접 ---------- 40
4. 4 저항 다점용접과 Nd:YAG 레이저 STITCH 용접 ----- 46
4.5 실험 결과 및 고찰 ---------- 49

제 5 장 결 론 ---------- 50

참고문헌 ---------- 53

Appendix ---------- 55

# ABSTRACT

## A study on the stitch welding by using Nd:YAG laser of high strength steel sheet in automobile

Jae-Seon Chu

Advisor : Prof. Han-Sur Bang, Ph.D.

Department of Naval Architecture

And Ocean Engineering

Graduate School of Chosun University

Application for laser welding have increased steadily in recent years due to its benefits such as high speed, high productivity and high density energy heat source. In this article these advantages of the laser welding has been considered for Nd:YAG laser stitch welding as a substitute for spot welding of lightweight car body plates.

Optimized parameters for Nd:YAG laser stitch welding have been determined comparing the economical and mechanical characteristics to match with the currently used spot welding characteristics.

A Finite Element based numerical comparison of thermal distribution in both the welding process has also been made in this study. Based on this calculated thermal history elasto-plastic thermal residual stress analysis has been carried out. The obtained numerical result are then compared with the experimentally measured value and found acceptable.

# 제 1 장 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

현재 자동차 산업분야에서 안정성 향상, 환경오염에 대한 규제, 연비개선 및 차체경량화 등의 문제를 해결하기위해 고강도 강판에 대한 사용량이 증가하고 있다. 또한, 레이저 빔의 높은 에너지 밀도는 고속 용접을 가능하게 하고 자동화가 용이하다는 장점이 있어 자동차 산업분야에서 접촉식 용접인 저항용접에서 비접촉식 레이저용접에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

이에 산업현장에서 고밀도 에너지 용접법의 적용이 확대되고 있으나 Nd:YAG Laser stitch 용접에 대하여 수치해석에 의한 역학적 특성에 관한 연구는 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 자동차 차체용 340MPa 급 고강도강판 SPRC340 에 대하여 레이저 Stitch 용접부에 대한 적정 용접조건을 제시하고 용접성을 확보한 후, 이러한 Nd:YAG 레이저 Stitch 용접의 적정용접조건에서 용접부의 열분포 및 용접잔류응력 특성에 대하여 수치 시뮬레이션을 통해 정도 높게 해석하고자 하였다.

# 제 2 장 열전도 해석

본 장에서는 저항 점용접부와 레이저용접부의 열적 특성을 규명하기 위해 2차원 축대칭 및 3차원 열분포 수치해석을 수행하였다. 또한 재료의 온도변화에 따른 온도 의존성을 고려하였고, 비정상 열전도 이론을 도입하여 유한요소식으로 정식화 한 후, 4절점 아이소파라메트릭 요소와 8절점 솔리드 요소를 이용한 열분포 해석용 프로그램을 사용하였다. 이에 본 장에서는 해석 모델에 대한 수치해석을 통해 접합부의 열적 특성을 파악하고자 하였다.

## 2. 1 해석 이론

물체의 표면에 대한 열적 경계조건은 물체 내에 온도차가 존재하면 열은 온도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 이동한다는 푸리에 법칙(Fourie's law)이며 식으로 나타내면 식(2.1)과 같다.

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \tag{2.1}$$

여기서,

$q$ : 열유속(heat flux), 물체내의 단위면적을 단위시간에 이동한 열량

$\frac{\partial T}{\partial n}$ : 열이 흐르는 방향의 온도구배

$T$ : 온도

$n$ : 열이 흐르는 방향 좌표

$\lambda$ : 열전도율(Thermal conductivity, Kcal/m · hr℃

해석에 사용한 열전도 프로그램에 대한 유한요소 정식화 과정에서는, 재료가 등방성(Isotropic)일 때, 위의 식(2.1)을 기초로 하여 미소 단위 체적에 유입되는 열량, 유출되는 열량을 x, y, z축에 구하여 다음의 식(2.2)와 같이 3차원 직교 좌표계의 비정상 열전도 방정식을 구할 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + Q \qquad (2.2)$$

여기서, $T$ : 온도(℃)

$\rho$ : 밀도(g/㎤)

$c$ : 비열(cal/g · ℃)

$Q$ : 단위시간당 입열량(cal/㎤ · sec)

상기 식(2.2)에서 재료를 등방성 재질로 가정하면 열전도율은 $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$ 로 가정할 수 있으며, 따라서 식(2.2)는 아래의 식으로 변환할 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \tag{2.3}$$

위의 식(2.3)에 Galerkin 법을 적용하면

$$\int_{v^e} [N]^T \left\{ \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dV = 0 \tag{2.4}$$

여기서, 위의 식(2.4)를 Green Gauss 정리를 이용하여 부분적분한 후 푸리에 법칙 $q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}$ 을 대입하여 정리하면 비정상 열전도 방정식을 다음과 같이 유한요소로 정식화할 수 있다.

$$[k]\{\phi\} + [c]\left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} = \{f\} \tag{2.5}$$

여기서, $[k]$ : 열전도 Matrix

$$\int_{v^e} \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV$$

$[c]$ : 열용량 Matrix $\int_{v^e} \rho c [N]^T [N] dV$

$\{f\}$ : 열유속 Matrix $\int_{v^e} Q [N]^T dV - \int_{S^e} q [N]^T dS$

$\{\phi\}$ : 절점 온도

해석된 물체 전체에서 유한요소식은 각 요소의 매트릭스를 조합하여 만들며 그것을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[K]\{\Phi\} + [C]\left\{\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right\} = \{F\} \tag{2.6}$$

여기서, $[\Phi]$:전체 물체에서 절점온도 벡터 $[\Phi] = \sum_e \phi$

$[K]$:전체 물체에서 열전도도 Matrix $[K] = \sum_e k$

$[C]$: 전체 물체에서 열용량 Matrix $[C] = \sum_e c$

$\{F\}$ : 전체 물체에서 열유동 Matrix $\{F\} = \sum_e f$

본 연구에서는 식(2.6)에 입각하여 구성된 열전도 프로그램을 이용하여 열분포 특성을 해석하였다.

## 2. 2 수치해석 조건

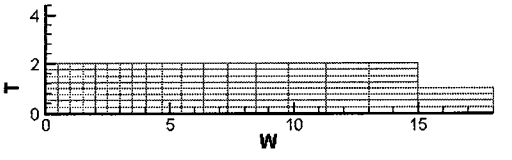
용접부의 열분포 특성에 대한 정확한 해석을 위해 다음과 같은 조건을 고려하였다.

- 2 차원 비정상 열전도 해석에 사용된 요소는 4-node Isoparametric 요소이며, 3 차원 비정상 열전도 해석에는 8-node Solid 요소를 사용하였다.
- 재료의 온도변화에 따른 온도의존성을 고려하였다.
- 열해석을 위한 경계조건으로 내부의 열전도 및 대기 중으로 열전달이 있는 것으로 하였다.
- 재료의 성질은 등방성(Isotropic)으로 가정하였고, 재료의 초기온도를 20℃로 가정하였다.
- 재료의 역학적 강성 회복 온도를 723℃로 가정하였다.

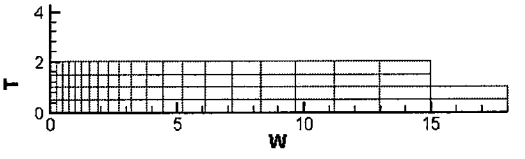
## 2. 3 해석 모델 및 용접조건

### 2. 3. 1 저항 점용접 및 레이저용접(2차원 해석)

3차원 해석을 수행하기 전, 먼저 해석프로그램의 신뢰성을 확인하고자 수치해석 후의 HAZ영역대와 실제 시험편에서의 HAZ영역대를 비교하기위해 2차원 해석을 실시하였다. 수치해석 모델은 Fig. 2.1에 나타내었다. 점용접에 대한 총 절점수는 167개, 총 요소수는 140개이고, 레이저용접에 대한 총 절점수는 108개, 총 요소수는 82개이다.




(a) Spot Welding




(b) Laser Welding

Fig.2.1 Mesh division

### 2. 3. 1 저항 단점용접

본 연구에 사용된 시험편은 자동차용 340MPa급 고강도강판인 SPRC340이며, 시험편의 크기는 규격 KB S 0851에 의거하여 100*30*1mm(W*L*T)로 선정하였다. Fig. 2.2는 유한요소 분할 형상을 나타낸 것으로 해석시 용접열원에 의해 큰 영향을 받을 것으로 사료되는 접합부는 용착부의 크기를 고려하여 세밀하게 요소분할 하였다. 또한 접합부에서 폭방향으로 멀어질수록 온도의 변화가 크게 나타나지 않으므로 폭방향으로 갈수록 요소분할 간격을 크게 하였다. 전체 요소수는 7000개이고, 전체 절점수는 9393개이다. 사용된 시험편의 화학적 조성비와 기계적 물성치는 Table 2.1과 Table 2.2에 나타내었으며, Table 3.3은 용접조건을 나타내었다.

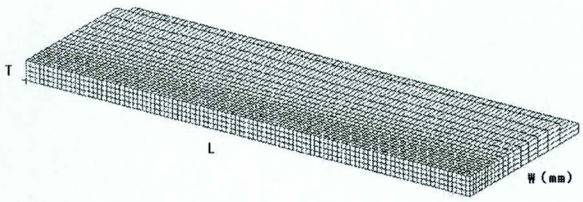



Fig. 2.2 Mesh Division

Table 2.1 Chemical properties of base metal(wt%)

| C | Si | Mn | P | S |
|---|---|---|---|---|
| 0.0006 | 0.02 | 0.004 | 0.140 | 0.076 |

Table 2.2 Mechanical properties of base metal

| Yield Strength | Tensile trength | Young`s Modulus | Elongation |
|---|---|---|---|
| 21.4 $kg/mm^2$ | 35.5 $kg/mm^2$ | 20000 $kg/mm^2$ | 41% |

Table 2.3 Spot welding parameters

| Electrode force | Welding current | Squeeze time | Welding time | Holding time |
|---|---|---|---|---|
| 180Kgf | 9KA | 30Cycle | 15Cycle | 10Cycle |

점용접에 대한 용접 입열 계산은 용접열원의 효과와 재료의 비선형화 즉, 재료정수의 온도의존성을 고려하였는데, 통전시 발열에 관계하는 모재의 비저항은 온도의 함수이므로, 결과적으로 열원은 시간과 거리의 함수가 된다.

따라서, 본 해석에는 통전단계에서 프로그램 해석시의 미소 시간증분마다 통전부 요소들의 온도를 계산한 후, 그에 따른 비저항 $r(T)$를 식 2.1에 의하여 산정하였다.

$$r(T) = r_0(1 + \alpha T) \tag{2.1}$$

여기서, $r_0$: 상온에서의 비저항, $\alpha$: 저항의 온도계수

용접금속의 각 요소에 대한 입열 $Q(r,t)$는 식2.1을 칼로리로 환산한 후, 식2.2를 이용하였다.

$$Q(r,t) = 0.24 \cdot V_e \cdot i^2 \cdot r(T) \cdot dt \quad (cal) \tag{2.2}$$

여기서, $r$ : 모재의 비저항(resistivity)

$t$ : 시간

$V_e$ : 요소의 체적

$T$ : 온도

$i$ : 전류밀도

## 2. 4 저항 다점용접

다점용접부의 열분포 해석을 위한 시험편의 크기는 규격 KB S 0851에 의거하여 300*100*1mm(W*L*T)로 선정하였으며, 그 형상은 Fig. 2.3에 나타낸 것과 같다. 또한 용접열원의 영향이 가장 많을 것으로 사료되는 부분을 단점용접과 동일하게 요소분할을 하였으며, 수치해석은 용접선 방향을 기준으로 Fig.2.3와 같이 한 방향만 해석하였다. 용접조건은 단점용접과 동일한 조건으로 하였고 피치간격은 상호 너깃형성과정에 영향을 미치지 않는 타점간 간격 30mm로 선정하였다. 총 요소수는 7000개이고, 총 절점수는 9393개이다.

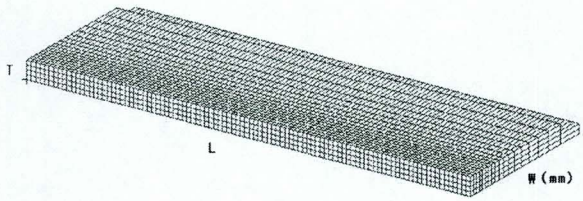



Fig. 2.3 Mesh Division

## 2. 5 Nd:YAG 레이저용접

본 연구에 사용된 시험편의 크기는 단점용접 시험편과 동일한 크기를 사용하였으며, 가장자리 5mm 갭을 주어 20mm 용접부에 대한 열분포 해석을 실시하였다. 수치해석모델은 Fig. 2.4에, 용접조건은 Table 2.4에 나타내었다. 총 요소수는 8200개이고, 총 절점수는 10908개이다.

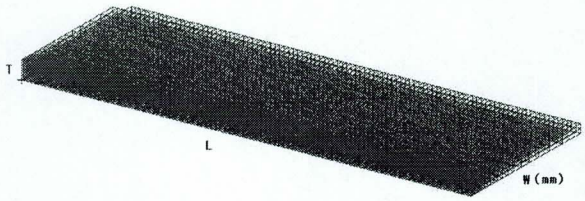



Fig. 2.4 Mesh Division

Table 2.4 Optimal laser welding condition

| Laser power | Focal depth | Welding speed | Shielding gas |
|---|---|---|---|
| 3.0KW | +1 mm | 2.5 m/min | Argon 15ℓ/min |

## 2. 6 Nd:YAG 레이저 STITCH 용접

본 해석에 사용된 시험편의 크기는 Multi-Spot Welding과 동일한 크기이며, Fig. 2.5에 나타내었다. 실험을 통해 레이저 stitch 용접의 피치는 60mm로 선정되었으나 수치해석상에서는 용접부와 선·후행 용접부 사이에서의 열적 및 용접잔류응력 특성에 대한 경향을 보고자 피치를 20mm로 하여 해석하였다. 총요소수는 10908개이고, 총절점수는 8200개이다.

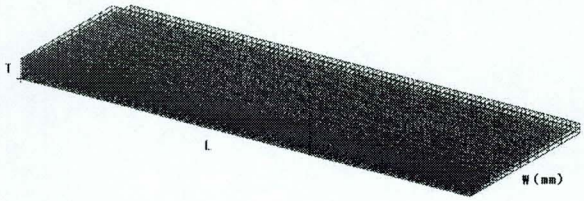
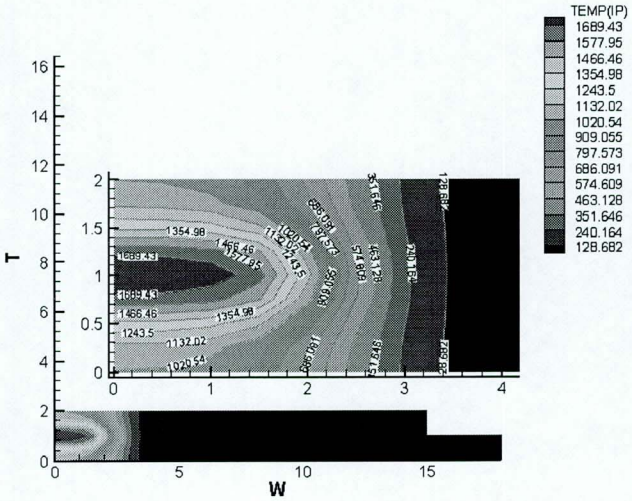


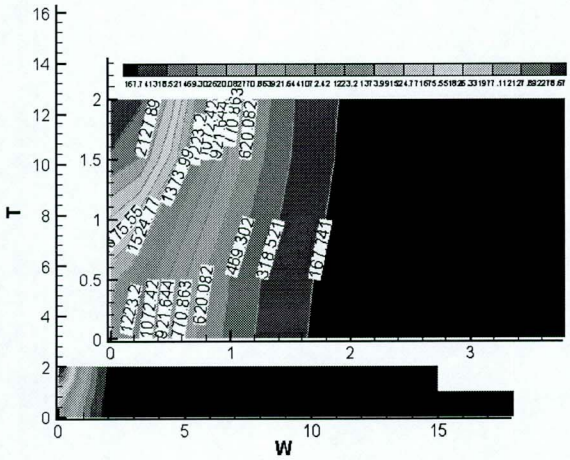

Fig. 2.5 Mesh Division

## 2. 7 열분포 특성

본 절에서는 3차원 비정상열전도 유한요소프로그램을 이용하여 접합부의 온도분포특성을 고찰하였다. Fig. 2.6은 저항점용접과 레이저용접부에 대하여 2차원 비정상 열전도 유한요소프로그램을 이용하여 수치해석상의 HAZ 영역대를 확인하였다. Fig. 2.9와 Fig. 2.10은 단점용접, 다점용접을, Fig. 2.11과 Fig. 2.12는 Nd:YAG 레이저용접, Nd:YAG 레이저 stitch용접의 접합중의 온도분포를 보여주고 있다. 좌표축은 용접선 방향을 X축으로, 용접선 직각방향(폭 방향)을 Y축으로, 두께방향을 Z축으로 하였다. Fig. 2.9와 Fig. 2.10처럼 단점용접의 경우 용접 열원이 이동하지 않고 저항발열에 의해 접합되므로 용접열원을 중심으로 하여 동심원 형태의 온도분포를 나타내고 있으며, Fig. 2.11과 Fig. 2.12의 Nd:YAG 레이저용접의 경우 용접 열원의 이동으로 인해 유선형 형태의 폭방향으로 퍼지는 온도분포 양상을 보여주고 있다. 또한, Fig. 2.6은 수치해석에 의한 열영향부 영역대와 단면사진의 열영향부를 상호비교하여 수치해석프로그램의 신뢰성을 입증하였다.




(a) Resistance spot welding




(b) Nd:YAG Laser welding

Fig. 2.6 Temperature Distribution

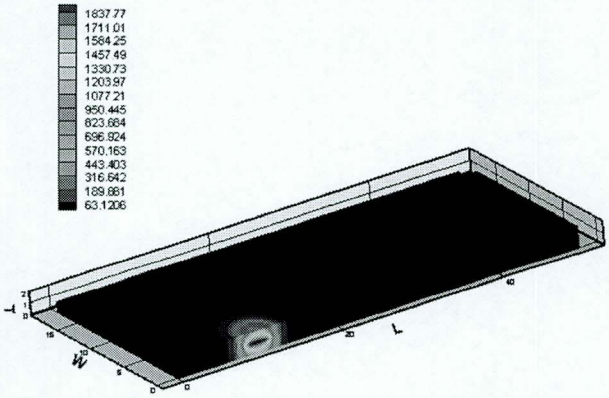



Fig. 2.7 Single-Spot Welding

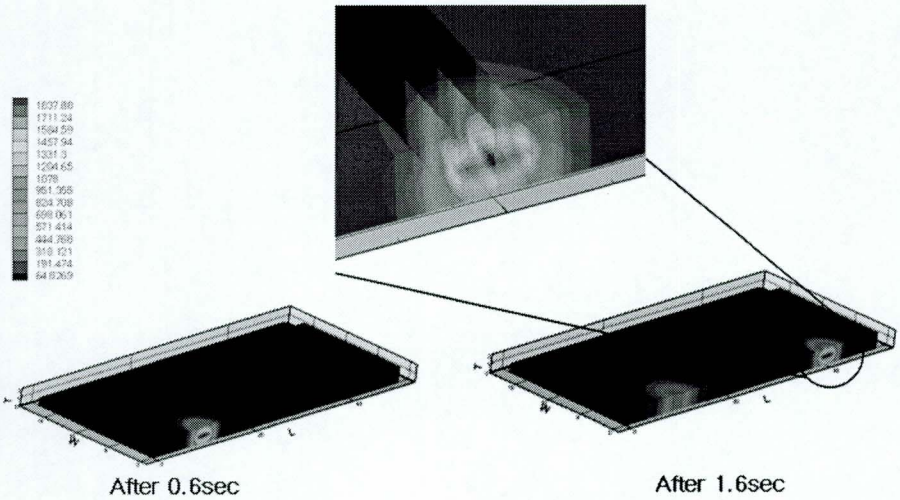



Fig. 2.8 Multi-Spot Welding

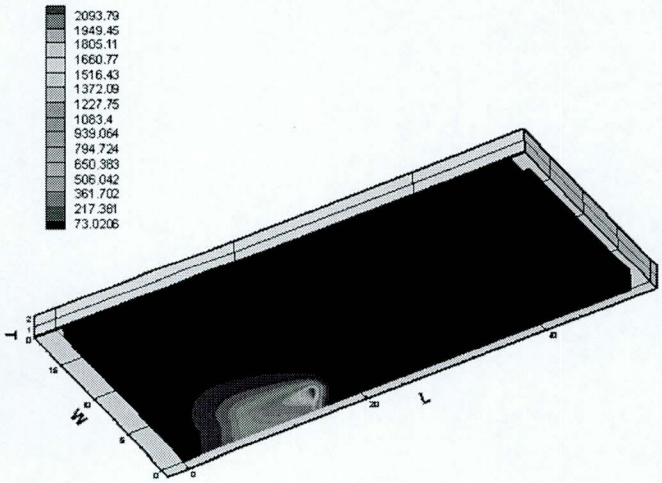



Fig. 2.9 Nd:YAG Laser Welding

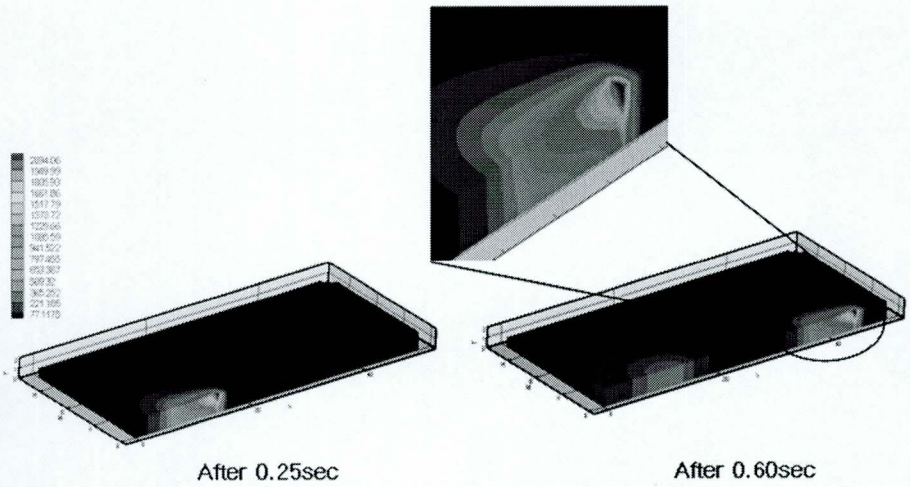



Fig. 2.10 Nd:YAG Laser Stitched Welding

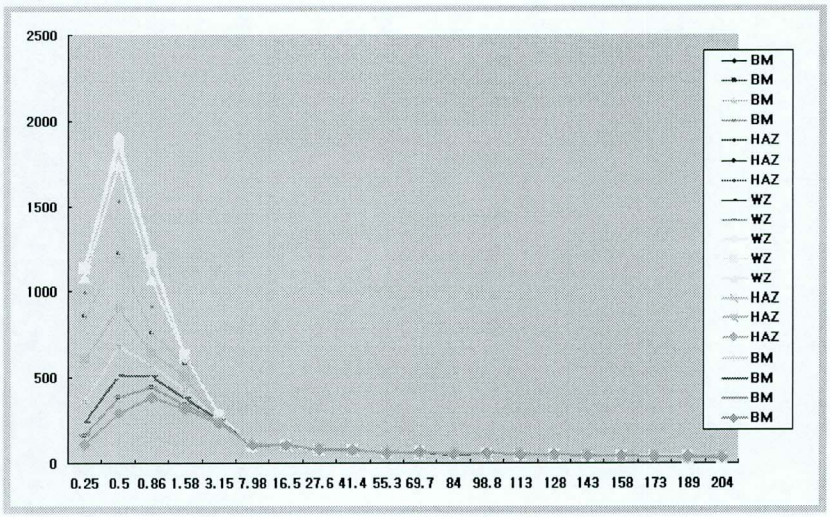



Fig. 2.11 Thermal history of Single-spot Welding

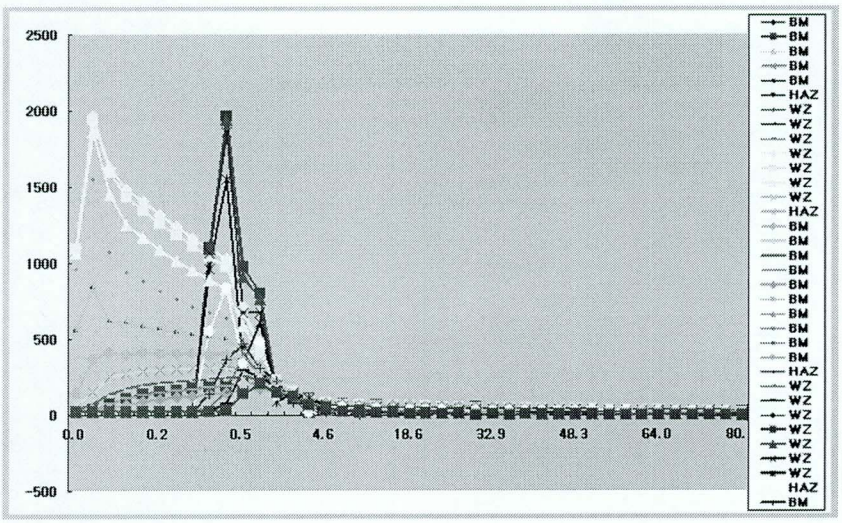



Fig. 2.12 Thermal history of Multi-spot Welding

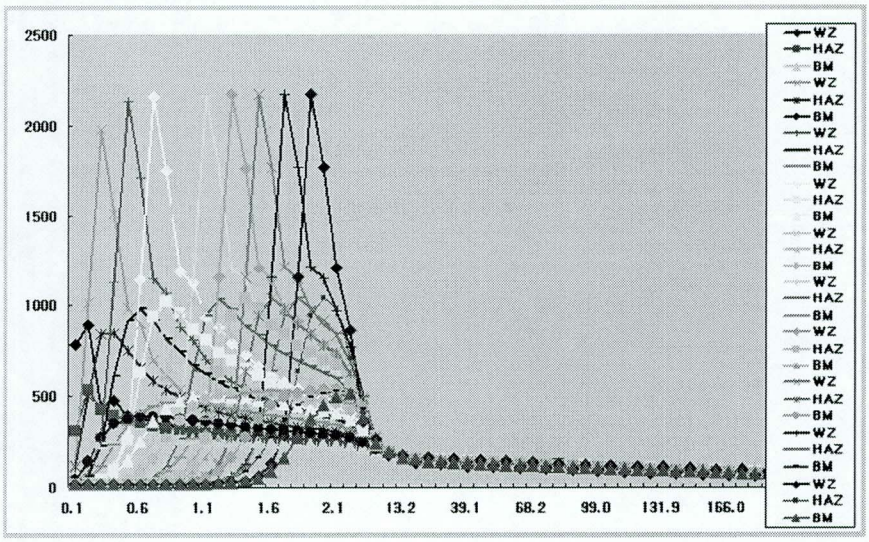



Fig. 2.13 Thermal history of laser welding

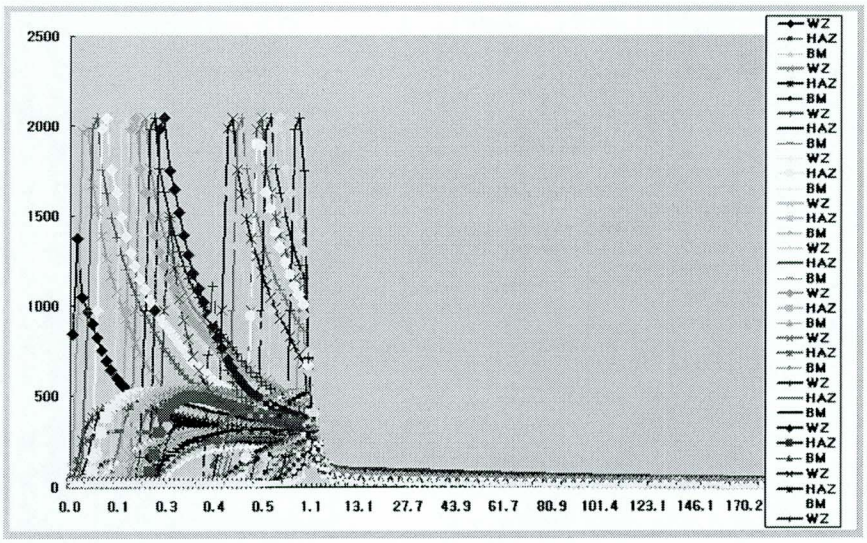



Fig. 2.14 Thermal history of laser stitch welding

Fig. 2.14와 Fig. 2.15 및 Fig. 2.16과 Fig. 2.17은 점용접과 레이저용접부의 두께방향 0.5mm에서의 접합부와 열영향부 및 모재 부분에 해당하는 요소의 용접 시작시부터 온도변화가 거의 없는 200초까지의 시간변화에 따른 온도변화를 나타낸 것이다. 열전도 해석의 경우 고온역이 존재하는 접합부에서 온도구배가 심하게 나타났으며, 레이저 용접이 점용접보다 심한 온도구배를 보이고 있다. Fig. 2.15와 Fig. 2.17에서 나타나는 온도분포 양상은 선행 용접부가 후행 용접부에 의해 열영향을 받아 선행 용접부의 온도구배가 후행 용접부의 온도구배보다 완만해짐을 보여주고 있다. 점용접의 경우 약 1800℃의 최고 온도분포를 보이고 있으며, 레이저용접의 경우 약 2200℃의 최고 온도분포를 보이고 있다. 또한 다점용접과 레이저 Stitch 용접의 경우 선행 용접부보다 후행 용접부에서 용접이 끝나기 직전에 최고 온도분포를 보이고 있다.

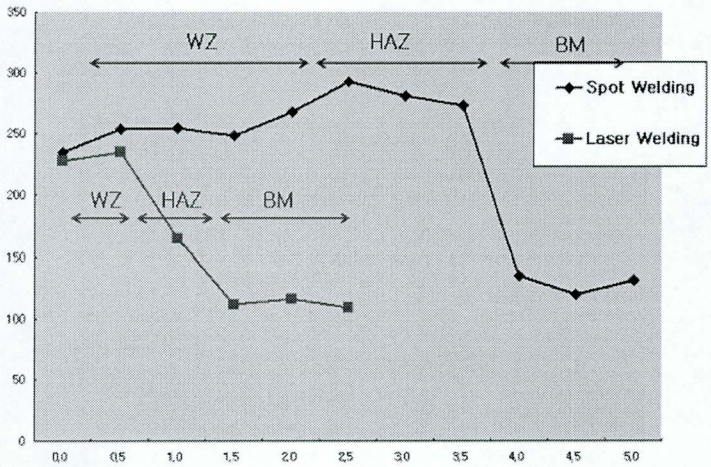



Fig. 2.15 Results of Hardness test(Hv)

또한, 해석조건으로 용접된 시험편에 일정 하중(500g)을 주어 경도값을 측정하여 평균값을 산출하였을 시, Fig. 2. 15에 나타난 바와 같이 레이저 용접의 열영향부가 점용접의 열영향부보다 적은 경도값을 나타내고 있다.

# 제 3 장 용접잔류응력 해석

## 3. 1 해석이론

용접 응력해석을 위하여 재료는 등방성으로 가정하였고, 탄성 및 소성 전영역에서 재료의 기계적 성질(항복응력, 탄성계수, 열팽창계수)의 온도의 존성을 고려하였으며, 소성역에서는 소성유동(Plastic-flow) 이론에 입각하여 증분형으로 나타내어 해석의 정도를 높였다. 또한, 선형등방경화법칙을 고려한 Von-Mises의 조건을 항복함수로 사용하였다. 사용되어진 관계식은 다음과 같다.

### 3. 1. 1 전변형률 관계식

$$\varepsilon_T = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^t \tag{3.1}$$

여기서, $\varepsilon^e$: 탄성변형률 , $\varepsilon^p$: 소성변형률 , $\varepsilon^t$: 열변형률

### 3. 1. 2 절점력과 절점변위의 관계

물체력을 무시하고 가상일의 원리(Principal of virtual work)에 따라 요소의

등가절점력증분 $\{dF\}$은 다음과 같다.

$$\{dF\} = [K]\{dU\} - \{dL\} \tag{3.2}$$

여기서, $[K] = \int_v [B]^T [D][B] dv$ : 요소의 강성 matrix

$\{dL\} = \int_v [B]^T [C] dT dv$ : 열에 의한 등가절점력

본 연구에 사용한 용접잔류응력 해석용 열탄소성 프로그램은 위의 식에 의거하여 구성되었다.

### 3. 1. 3 응력-변형률 관계식

재료의 물리적 성질이 온도 의존성을 고려한, 응력 증분의 영향을 $[C]dT$ 라고 하면, 응력-변형률 관계식은 식(3.3)과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\} - [C]dT \tag{3.3}$$

여기서, $[D^e]$ : 탄성 응력-변형률 matrix,

$\varepsilon^t$ : 열변형률

$\alpha$ : 선팽창계수

### 3. 1. 4 탄성역에서의 응력-변형 관계식

재료가 탄성거동을 하는 경우에는 전변형률은 열변형률과 탄성변형률과의 합이 되므로 다음 식(3.4)로 표현된다.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^t\} \tag{3.4}$$

또한, 응력 $\{\sigma\}$ 와 탄성변형률 $\{\varepsilon^e\}$ 은 탄성matrix $[D^e]$을 이용하여 증분으로 나타내고, 탄성변형률 $\{\varepsilon^e\}$는 응력 $\{\sigma\}$ 및 온도 $T$ 의 함수이므로, 식을 정리하면 탄성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식이 구해진다.

$$\begin{aligned}\{d\sigma\} &= [D^e]\{d\varepsilon\} - [D^e]\left(\frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\} + \{\alpha\}\right)dT \\ &= [D^e]\{d\varepsilon\} - \left([D^e]\{\alpha\} - \frac{1}{E}\frac{E-E_1}{\Delta T}\{\sigma\}\right)dT \\ &= [D^e]\{d\varepsilon\} - \{C\}dT\end{aligned} \tag{3.5}$$

여기서, $E_1$ : 온도변화$(\Delta T)$ 후의 탄성계수

$$\{C\} : [D]^e \alpha \frac{1}{E} - \frac{E-E_1}{\Delta T}\{\sigma\}$$

### 3. 1. 5 소성역에서의 응력-변형 관계식

재료의 항복응력 $\sigma_y$ 는 온도 $T$ 와 소성일(plastic work) $W^P(\bar{\sigma},\ \varepsilon^P)$의 함수로서 $\sigma_y(T,\ W^P)$로 하고, 항복함수 $F$ 는 응력 $\{\sigma\}$와 항복응력 $\sigma_y$ 로부터

$$F = f - f_0 = f(\sigma) - f_0(\bar{\varepsilon}^p, T) = \bar{\sigma}^2 - \sigma_0^2(\bar{\varepsilon}^p, T) \tag{3.6}$$

재료가 소성역에서 부하상태(loading state)에 있을 경우에는 $dF = 0$의 조건을 만족해야 하므로,

$$dF = \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T \{d\sigma\} - \left\{\frac{\partial f_0}{\partial \bar{\varepsilon}^p}\right\}^T - \frac{\partial f_0}{\partial T} dT = 0 \tag{3.7}$$

여기서, $\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T$ : 상당응력의 변화,

$\left\{\frac{\partial f_0}{\partial \bar{\varepsilon}^p}\right\}$: 가공경화,

$\frac{\partial f_0}{\partial T}$: 온도증분

소성역에 도달한 재료는 비압축성을 나타내고, 항복함수를 소성포텐셜로 가정하면, 소성변형률 증분은 다음 식이 된다.

$$\{d\varepsilon^p\} = \lambda \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\} \tag{3.8}$$

여기서, $\left\{\dfrac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}$ : 편차응력,

$\lambda$ : 양(+)의 스칼라양

또한, 위의 식은 폰-미세스(Von-mises) 항복조건을 따른다.

전변형률 증분 $\{d\varepsilon\}$ 은 탄성, 소성 및 열변형률의 합이므로,

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\} + \{d\varepsilon^t\} \tag{3.9}$$

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon\} - [D^e]\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\}\lambda - [D^e]\{\alpha\}dT + \frac{d[D^e]}{dT}[D^e]^{-1}\{\sigma\}dT \tag{3.10}$$

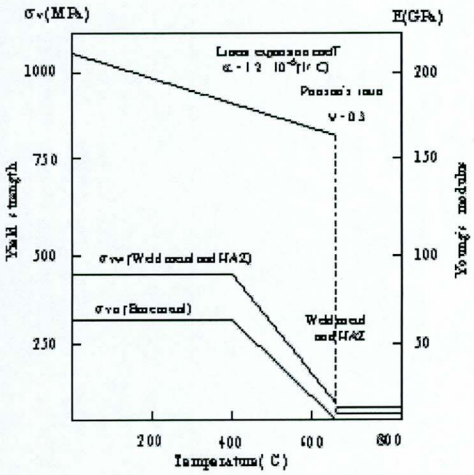



Fig. (a) Material Properties

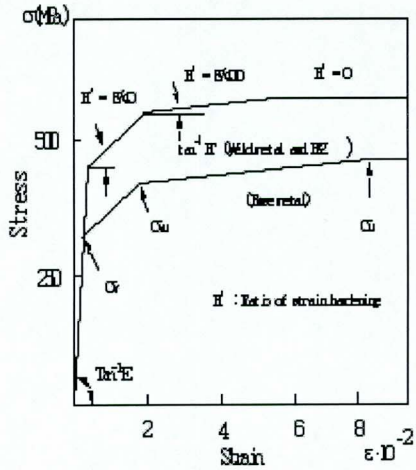



Fig. (b) Plastic-Flow

## 3. 2 해석 모델 및 해석방법

열탄소성 해석을 위한 유한요소 모델은 2장에서 열분포 해석 시 사용한 모델과 동일하다. 점용접부와 Nd:YAG laser 용접부의 용접잔류응력을 해석하기 위하여 열탄소성 수치해석 프로그램을 이용하였다. 열분포 해석으로부터 얻은 결과데이터를 입력데이터로 사용하였으며, 다음과 같은 조건을 고려하여 수치해석을 하였다.

1) SPRC340의 기계적 성질(항복응력, 탄성계수, 열팽창계수)의 온도의존성을 고려하였다.
2) 재료는 등방성으로 가정하였다.
3) 수치해석을 위한 입력데이타는 열분포 해석시의 전과정의 온도분포 이력을 입력데이터로 이용하였다.
4) 온도상승 및 냉각과정의 열분포를 열하중으로 하였다.

## 3. 3 경계조건

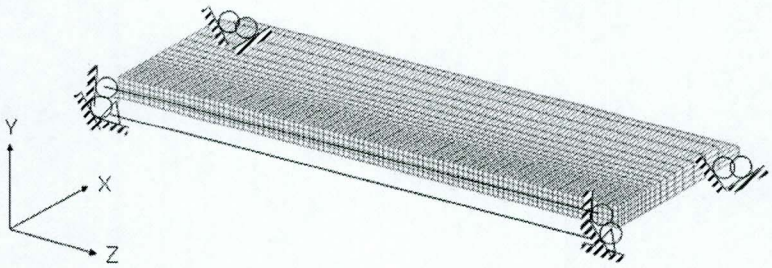



Fig. 3.1 Boundary condition of Spot & Laser Welding

열-탄소성 해석 시, 경계조건은 수축과 팽창을 고려하여 Fig. 3.1에 나타낸 것과 같다. 점용접과 레이저 용접부의 용접잔류응력 해석에서 사용된 경계조건은 좌측 끝단의 하단부를 X, Y방향에 대하여 완전 고정하고 양끝단을 Z방향으로 고정하였으며, 좌측 끝단의 모든 절점에 대하여 X방향 구속을, 우측 끝단의 하단부와 하판 우측 끝단의 하단부에 대하여 Y방향 구속을, 시험편의 각 모서리에 Z방향으로 구속하여 폭방향에 대하여 자유로운 수축, 팽창을 할 수 있도록 구속하였다.

## 3. 4 용접잔류응력 분포 특성

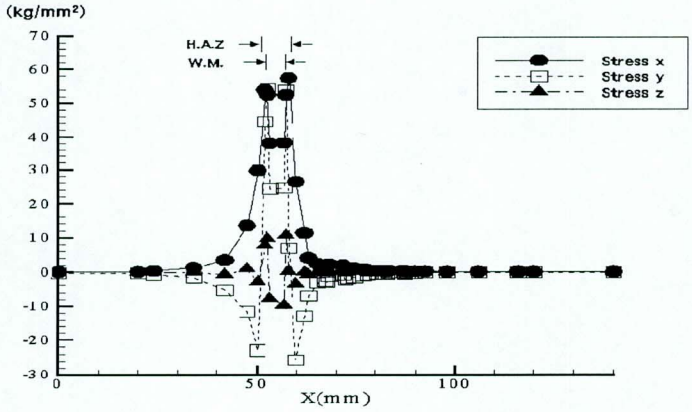



Fig. 3.2 Total stress distribution of Single spot Weldment

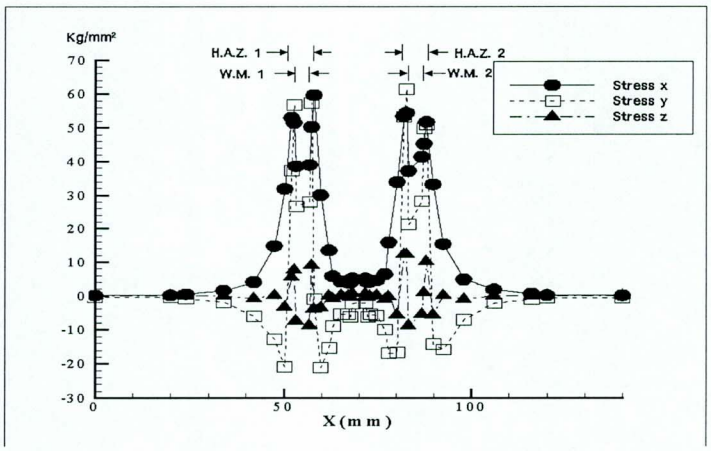



Fig. 3.3 Total stress distribution of Multi spot Weldment

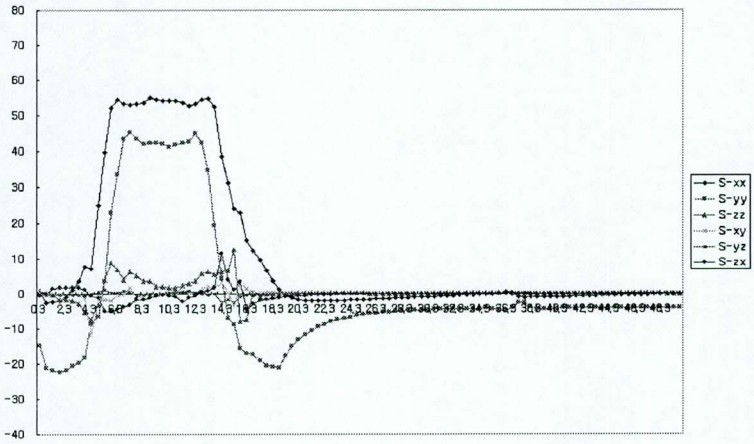



Fig. 3.4 Total stress distribution of Nd:YAG Laser Weldment

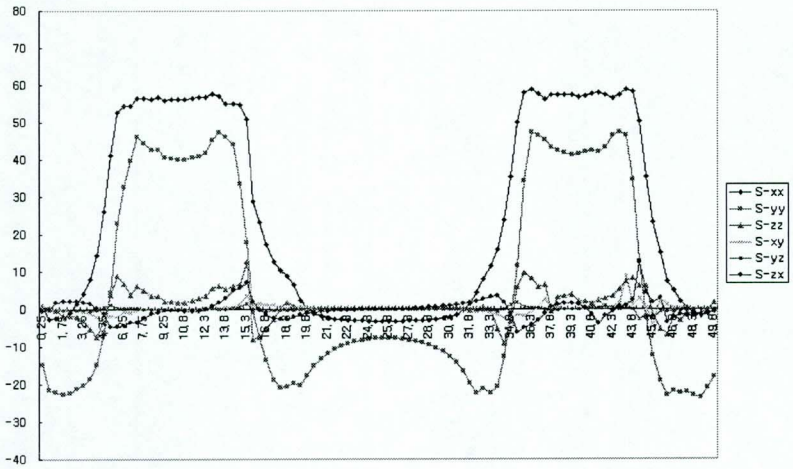



Fig. 3.5 Total stress distribution of Nd:YAG Laser stitch Weldment

용접잔류응력 해석 시, 입력 데이터는 열전도 해석 시의 전과정의 온도분포 이력을 입력 데이터로 하여 열-탄소성 프로그램을 사용하여 해석결과

에 대한 역학적 특성을 규명하였다. Fig. 3.2, Fig. 3.3는 단점용접과 다점용접, Fig. 3.4, Fig. 3. 5은 레이저용접과 레이저 스티치용접의 접합부상부에서 두께방향으로 0.5mm지점의 용접선방향 용접잔류응력($\sigma_x$)과 폭방향용접잔류응력($\sigma_y$), 두께방향 용접잔류응력($\sigma_z$)을 용접선길이방향에 따라 도시한 그래프이다.

점용접일 때의 용접 잔류응력의 특징을 살펴보면, 용접금속에 발생된 잔류응력은 용접후 용접금속이 온도 냉각과정임에도 불구하고 역학적 강성회복 온도(723℃)이하로 냉각되어지면 자체의 강성을 회복함과 더불어 용접금속의 수축을 온도가 낮은 모재가 구속하기 때문에 용접금속에 응력이 발생되어지는데, 용접선방향의($\sigma_x$)는 용접선 길이의 전체에 걸쳐 인장이 발생되는데, 그 중에서도 열영향부에서 ($\sigma_x$)가 최대가 되고 모재로 갈수록 점차 작아지다가 일정해진다.

그리고 폭방향($\sigma_y$)는 용접금속 및 열영향부에서 인장을 나타내고 열영향부에서 최대가 되며 열영향부에 인접하는 모재에서 압축으로 변화한다. 두께 방향의 응력성분($\sigma_z$)는 용접금속에서 압축이 되고 열영향부에서 인장성분을 나타내지만 점차 작아져 열영향부에 인접하는 모재에서 압축으로 변화하는데 그 크기는 작게 나타났다. 특히, 두께 방향의 응력성분($\sigma_z$)는 다른 성분 값에 비해 작게 나타나는데, 이는 역학적 구속력이 길이 및 폭방향에 비해 적기 때문이라 사료된다. 또한, 각 응력성분 모두 너깃의 외

단부인 너깃주위의 열영향부에서 최대값이 나타남을 알 수 있다.

다점용접일 때의 용접잔류응력을 살펴보면, 후행타점 점용접부의 용접잔류응력은 용접선방향($\sigma_x$ )와 폭방향($\sigma_y$ )는 용접금속 및 열영향부에서 인장응력 성분이 나타나는데 두께방향($\sigma_z$)는 압축성분을 보이고 있으며, 모재에서 용접선방향($\sigma_x$)는 인장응력 성분이 발생하고 폭방향($\sigma_y$)는 열영향부에 인접하는 모재에서 인장응력이 발생하지만 모재에서는 압축응력 성분이 나타났다.

Nd:YAG 레이저 용접일 때의 용접잔류응력을 살펴보면, 용접선방향의 용접잔류응력($\sigma_x$)이 폭방향의 용접잔류응력($\sigma_y$)보다 전체적으로 다소 높은 값을 보이고 있으며, 용접선방향의 용접잔류응력($\sigma_x$)은 전체적으로 인장응력 성분이 나타나고 있으며, 폭방향의 용접잔류응력($\sigma_y$)은 접합부 부근에서 인장응력성분이 나타나지만 모재에서는 압축응력성분을 보이고 있다. 또한, 용접선방향과 폭방향의 용접잔류응력($\sigma_x$, $\sigma_y$)이 용접부의 양단에서 최대값을 보이고 있다. 이러한 점들은 점용접에서 나타난 용접부 및 용접부 주위에서 나타나는 용접잔류응력의 분포가 비슷한 경향을 보여주고 있다.

# 제 4 장 실 험

## 4.1 실험 방법

본 연구는 저항점용접 및 Nd:YAG 레이저용접의 적정용접조건을 선정한 후, 선정된 용접조건으로 단점 용접부에 대한 KS B 0851 규격에 준한 인장시험을 수행하여 인장하중를 기준으로 하여 Nd:YAG 레이저 Stitch 용접부의 길이를 결정하였고, 실제 자동차에서 점용접된 용접부의 간격을 조사하여 다점 용접부의 길이를 60mm 로 결정한 후 이 시험편에 대한 인장하중을 기준으로 하여 Nd:YAG 레이저 Stitch 용접부 간격을 결정하였다.

본 실험에서 저항점용접조건을 선정하고자 사용된 용접장비는 최대가압력 1000Kgf, 최대용접전류 27KA 인 공압식 용접기와 MM-601A 가압력 측정기를 사용하였고 용접조건은 가압력, 전류, 시간을 변수로 하였으며, 또한 각 용접조건별로 20Ton 용량의 인장시험기를 이용하여 인장하중을 측정한 후 적정 용접조건을 선정하였다. Nd:YAG 레이저용접조건을 선정하고자 사용된 용접장비는 3KW 급 Nd:YAG laser 용접기를 이용하여 Laser Power, Welding Speed 를 변수로 하였으며, Focal Depth 는 +1mm, Sheild Gas 는 Argon 15ℓ/min 로

용접하였으며 표면 비드상태와 매크로 조직단면 사진을 통해 선정된 용접조건을 이용하여 점용접과 같은 크기의 시험편에 10mm, 15mm, 20mm 로 용접하였으며 각각 인장시험을 실시하여 점용접의 인장하중과 비교하여 Nd:YAG 레이저 Stitch 용접부의 길이를 결정하였다. Nd:YAG 레이저 Stitch 용접부의 간격은 다점용접 시험편 SPRC340 을 300 x 100 x 1mm 크기로 30mm 겹쳐 제작하였으며, 점용접의 간격을 실제 자동차의 점용접부 간격을 조사하여 60mm 로 정하여 인장시험을 실시하였다. 다점용접 시험편과 동일한 크기로 Nd:YAG 레이저 Stitch 용접을 선정된 적정용접조건으로 20mm 용접하고 간격을 40mm, 50mm, 60mm 로 하여 인장시험을 실시한 후, 다점 용접부 인장하중과 비교하여 Nd:YAG 레이저 Stitch 용접부의 간격을 결정하였다.

또한, 수치해석의 타당성을 검증하기 위하여 접합부의 열영향부 크기를 측정하였으며, WZ, HAZ, BM 에 대한 경도를 측정하였다.

## 4.2 저항 단점용접

본 실험에서 사용된 재료는 두께가 1mm 인 자동차 차체용 340Mpa 급 고강도강판 SPRC340 이며, 인장시험편은 KS B 0851 의 규격으로 제작하였으며 그 형상은 Fig 1 에 나타내었다. SPRC340 의 화학적 조성비 및 기계적 물성치는 각각 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다.

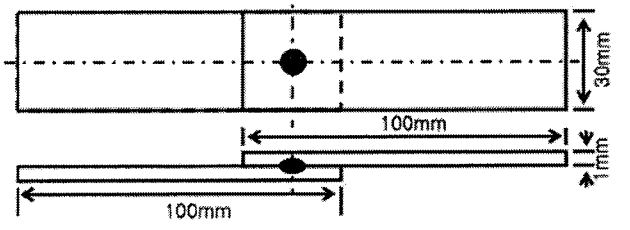



Fig 1. Single spot welded specimen geometry for tensile-shear test

Table 1. Chemical properties of base metal(wt%)

| C | Si | Mn | P | S |
|---|---|---|---|---|
| 0.0006 | 0.02 | 0.004 | 0.140 | 0.076 |

Table 2. Mechanical properties of base metal

| Yield Strength | Tensile Strength | Young`s Modulus | Elongation |
|---|---|---|---|
| 21.4 kg/mm$^2$ | 35.5 kg/mm$^2$ | 20000 kg/mm$^2$ | 41% |

저항점용접의 적정용접조건을 선정하기 위하여 가압력, 용접전류, 용접시간을 변수로 하여 실시하였으며, 용접조건은 Table 3 에 나타내었다.

Table 3. Spot welding parameters

| Electrode force | Welding current | Squeeze time | Welding time | Holding time |
|---|---|---|---|---|
| 180, 200, 220Kgf | 8~11KA | 30Cycle | 10, 15, 20Cycle | 10Cycle |

Fig. 2 은 가압력 180, 200, 220Kgf 에서 통전시간을 각 10, 15, 20cycle 과 전류를 6~11KA 의 범위로 각 3 개씩 시험편을 제작 용접하여 인장전단시험을 실시한 결과이며 통전전류 6, 7KA 의 시험편은 용접조건 중 가압력 220Kgf, 통전시간 10, 15cycle 은 11KA 에서, 나머지 용접조건 중에서는 통전전류 10KA 에서 스패터가 발생하였다.

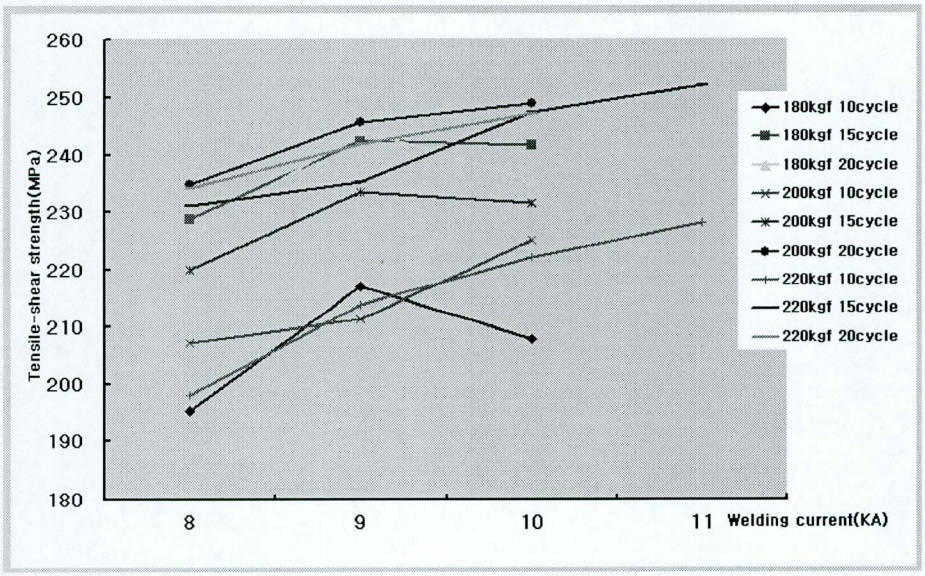



Fig 2. The tensile test results of single-spot joint

Table 4. Optimal spot welding condition

| Electrode force | Welding current | Squeeze time | Welding time | Holding time |
|---|---|---|---|---|
| 180 Kgf | 9 KA | 30 Cycle | 15 Cycle | 10 Cycle |

또한, 높은 인장하중을 보이는 조건을 선별하여 너깃의 직경을 관찰한 후 Table 4 의 적정용접조건을 선정하였다.

## 4.3 Nd:YAG 레이저 용접

용접장비는 3KW 급 Nd:YAG Laser 용접기를 이용하여 Laser Power, Welding Speed 를 변수로 하였으며, Focal Depth 는 +1mm, Sheild Gas 는 Argon 15ℓ/min 로 하였다. 용접조건은 Table 5 에 나타내었다. 표면 비드상태와 매크로 조직단면 사진을 통해 적정용접조건을 선정하였다. 선정된 용접조건을 이용하여 점용접과 같은 크기의 시험편에 10mm, 15mm, 20mm 로 용접하였으며, 그 형상은 Fig. 3 에 나타내었다. 각각 인장시험을 실시하여 점용접의 인장하중과 비교하여 레이저 Stitch 용접부의 길이를 결정하였다.

Table 5. Laser welding parameters

| Laser power | Focal depth | Welding speed | Shielding gas |
|---|---|---|---|
| 2.0, 2.5, 3.0 KW | +1 mm | 1.0~3.0 m/min<br>(0.5 씩 증가) | Argon 15ℓ/min |

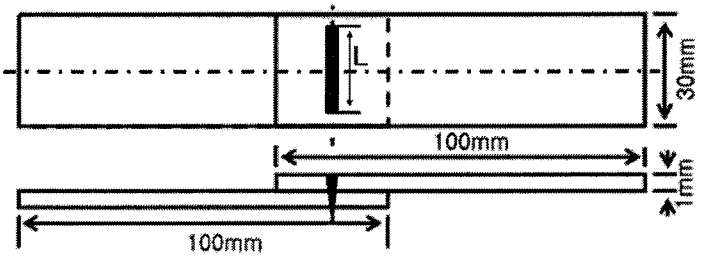



Fig 3. Laser welded specimen geometry for tensile test

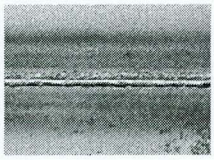
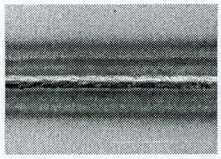
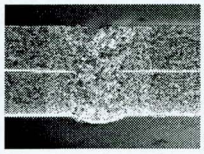
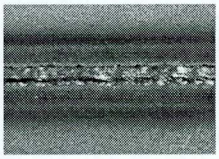
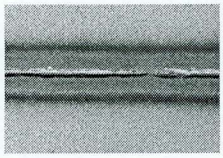
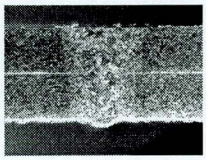
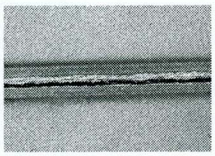
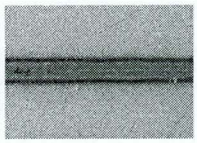
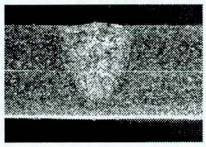
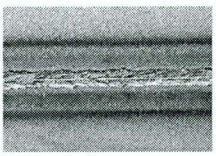
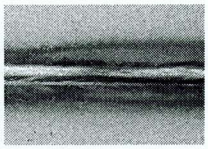
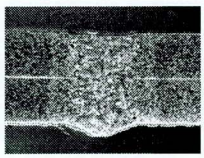
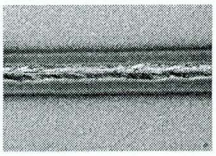
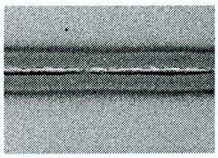
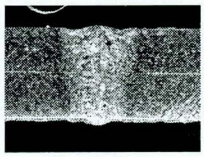
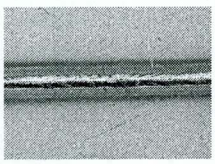
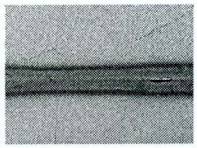
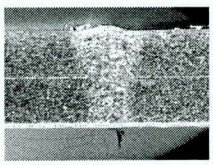
: L=10mm, 15mm, 20mm

Nd:YAG 레이저 용접의 적정용접조건 선정은 완전용입이 일어나는 조건중에서 용접부에 기공등의 용접결함이 없는 출력 3KW, 용접속도 2.5m/min 를 선정하였으며 Table 6 과 7 은 선정된 용접조건과 용접부 비드상태와 단면을 보여준다.

Table 6. Optimal laser welding condition

| Laser power | Focal depth | Welding speed | Shielding gas |
|---|---|---|---|
| 3.0KW | +1 mm | 2.5 m/min | Argon 15ℓ/min |

Table 7. Bead shape and cross section of Nd:YAG laser welds

| Welding Speed | | Top bead | Bottom bead | section |
|---|---|---|---|---|
| 2.0KW | 1.0m/min |  |  |  |
| | 1.5m/min |  |  |  |
| | 2.0m/min |  |  |  |
| 2.5KW | 1.5m/min |  |  |  |
| | 2.0m/min |  |  |  |
| | 2.5m/min |  |  |  |

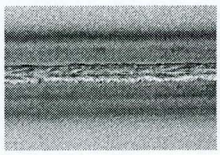
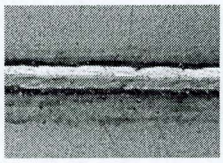
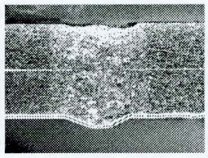
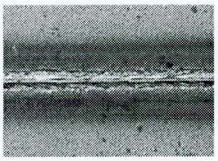
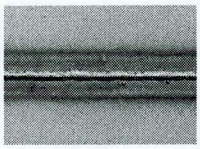
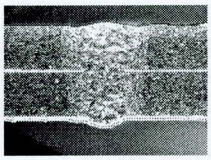
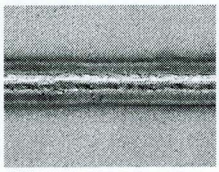
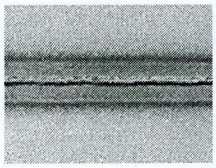
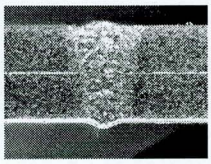
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 3.0KW | 2.0m/min |  |  |  |
| | 2.5m/min |  |  |  |
| | 3.0m/min |  |  |  |

Table. 8 은 선정한 점용접조건과 Nd:YAG 레이저용접조건으로 30*100*1mm 크기의 시험편에 용접하여 인장시험을 실시한 것이다.

Table 8. Spot and laser welded specimen after tensile-shear test

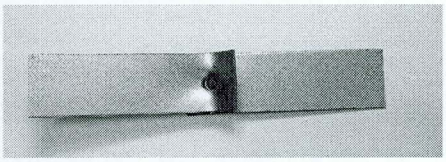
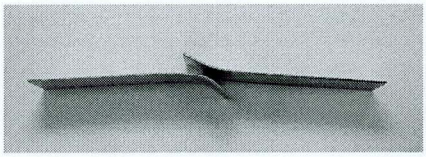
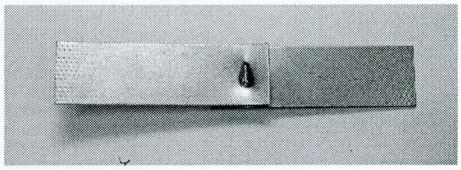
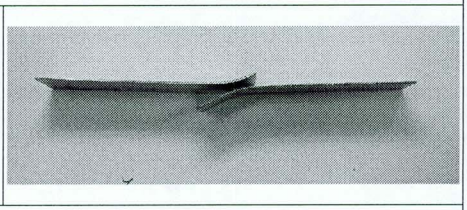
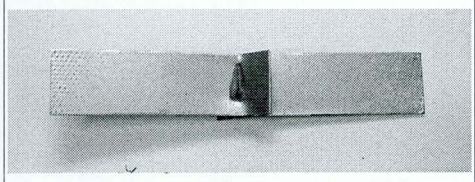
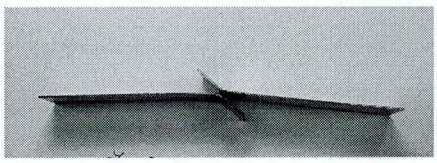
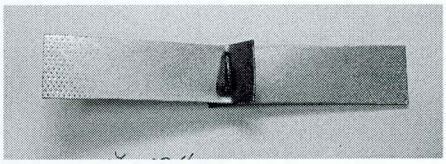
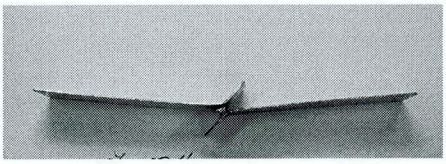
| | |
|---|---|
|  |  |
| Spot Weld | |
|  |  |
| Laser Weld 10mm | |
|  |  |
| Laser Weld 15mm | |
|  |  |
| Laser Weld 20mm | |

Fig. 4 는 레이저용접부(L=10, 15, 20mm)에 대한 인장시험 결과를 그래프로 나타내었다.

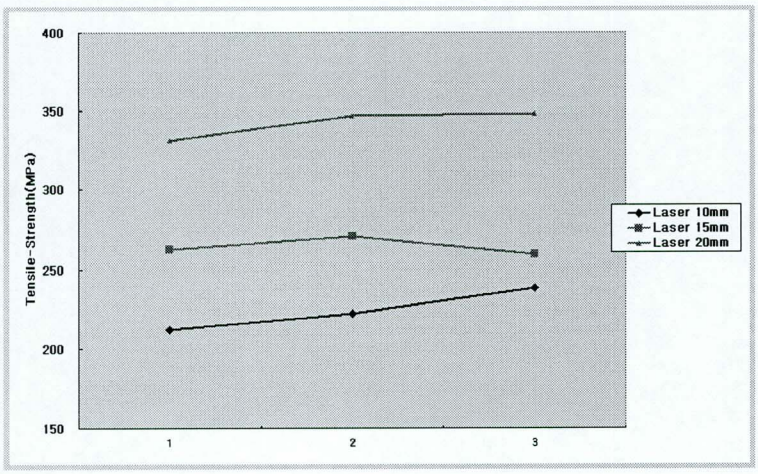



Fig. 4 Result of tensile test in Nd:YAG laser welding(L=10, 15, 20mm)

## 4. 4 저항 다점용접과 Nd:YAG 레이저 STITCH 용접

SPRC340 을 300 x 100 x 1mm 크기로 30mm 겹쳐 제작하였으며 그 형상과 용접조건은 각각 Fig 4, Table 5 에 나타내었다. 점용접의 간격을 실제 자동차의 점용접부 간격을 조사하여 60mm 로 정하였으며 인장시험을 실시하였다.

Nd:YAG laser stitch 용접 시험편은 다점용접 시험편과 동일한 크기로 Table 6 에 나타낸 용접조건으로 20mm 용접하고 간격을 40mm, 50mm, 60mm 로 하여 인장시험을 실시한 후 Nd:YAG laser stitch 용접의 적정 용접조건을 선정하였다. 그 형상은 Fig. 5 에 나타내었으며, 인장시험의 결과치는 Fig. 6 에 나타내었다.

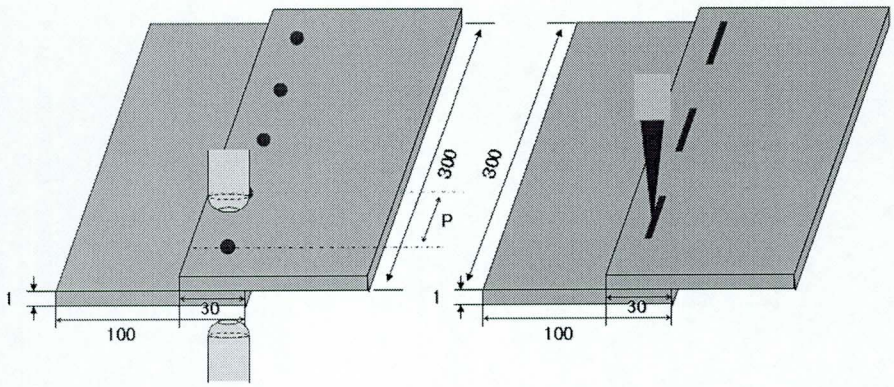



Fig 5. Specimen geometry for tensile test ; P=60mm

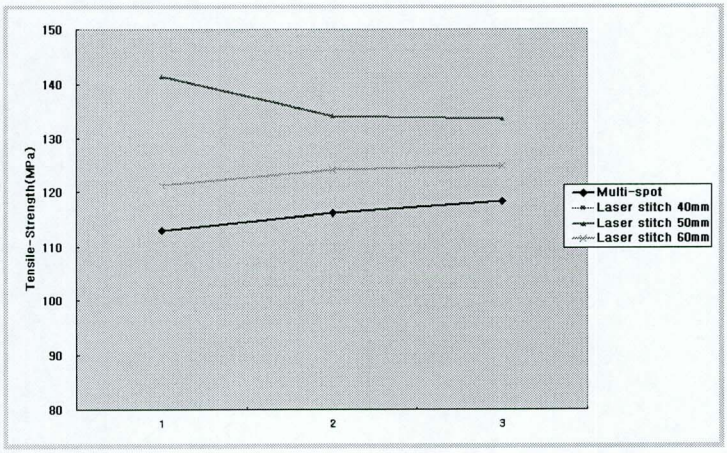



Fig. 6 Results of tensile test in Multi-spot & Laser stitch weld

Fig 6 는 단점용접과 동일한 시험편에 각각 레이저 용접을 10mm, 15mm, 20mm 를 하여 인장시험을 실시한 결과이다.

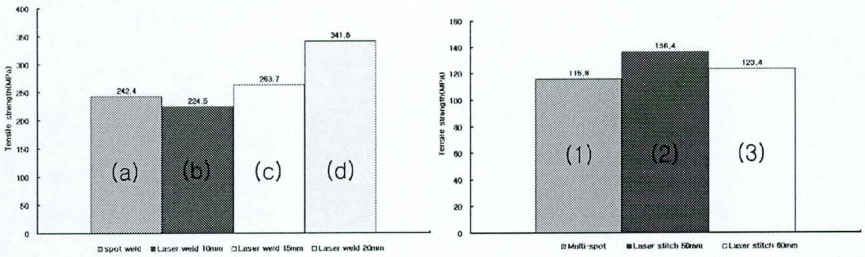



Fig 5. The tensile-shear test results

(a) Single spot : 242.4MPa (b) Laser 10mm : 224.5MPa (c) Laser 15mm : 263.7MPa

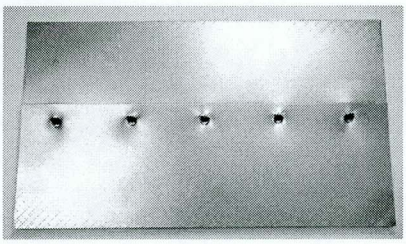
(d) Laser 20mm : 341.6MPa

(1) Multi spot : 115.8MPa (2) Laser stitch 50mm : 136.4MPa(3) Laser stitch 60mm : 123.4MPa

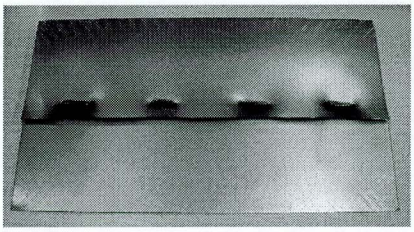
이 결과를 토대로 레이저 용접부 양단의 크레이터를 고려하여 레이저 Stitch 용접부의 길이를 결정하였다.

Fig 6 은 300*100*1mm 크기의 강판을 30mm 씩 겹쳐 60mm 간격으로 용접한 다점용접과 동일한 시험편에 레이저 Stitch 용접을 각각 40mm, 50mm, 60mm 로 하여 인장시험을 실시한 후의 시험편이다.. 간격 40mm 는 장비의 측정 한계를 넘어 인장시험의 결과치를 얻지 못하였다.

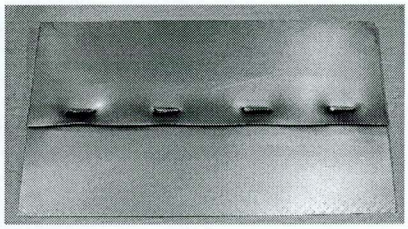
Table 9. Multi-spot and laser welded specimen after tensile test



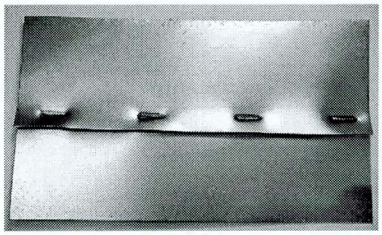
Multi-spot weld



Laser stitch weld



Laser stitch weld



Laser stitch weld

## 4.5 실험 결과 및 고찰

본 실험는 자동차 차체용 340MPa 급 고강도 강판에 대한 Nd:YAG 레이저 Stitch 용접의 적정 용접조건을 찾기 위한 실험으로 두께 1.0mm 의 박판을 사용하여 저항점용접을 실시하여 인장시험을 수행한 후 저항점용접의 인장하중을 기준으로 하여 레이저 Stitch 용접부의 길이 및 간격을 결정하여 적정용접 조건을 얻고자 하였다.

1) Nd:YAG Stitch 용접부의 길이는 용접부 양단에 발생하는 크레이터가 인장강도에 영향을 미칠 것으로 사료되어 점용접 240MPa 에 비해 인장강도가 340MPa 로 상대적으로 높은 인장하중을 갖는 Nd:YAG 레이저 용접부 길이 20mm 의 결과를 얻었다.

2) Nd:YAG Stitch 용접부의 간격은 300*100*1mm 크기의 시험편에 Multi-Spot 및 레이저 Stitch 용접을 실시하여 인장강도 116MPa 에 준하는 인장강도 123MPa 인 간격 60mm 의 결과를 얻었다.

# 제 5 장 결 론

본 연구는 자동차 차체 용접법에 대한 고품질의 레이저 Stitch 용접 공정의 적용을 검토하기 위해 레이저 Stitch 용접부의 역학적 특성을 수치해석적인 방법을 통하여 용접부에 대한 열분포 및 용접잔류응력의 특성을 알아보고자 하였다.

► 용접부에 대한 열전도 해석시 저항점용접의 경우 용접열원을 중심으로 사방으로 퍼지는 온도분포 경향을 보이고 있는 반면에, 레이저용접의 경우 용접열원의 이동으로 인해 폭방향으로 퍼지는 온도분포 경향을 보이고 있다.

► 레이저 용접이 저항점용접보다 다소 높은 온도분포를 보이고 있으며, Nd:YAG Laser 용접부의 경우 저항점용접부에 비해 냉각구배가 커 열영향부의 영역대가 점용접부에 비해 매우 적음을 알 수 있다.

► 열탄소성 해석 시, 용접선방향의 용접잔류응력($\sigma_x$)이 폭방향의 용접잔류응력($\sigma_y$)보다 전체적으로 다소 높은 값을 보이고 있으며, 용접선방향

의 용접잔류응력($\sigma_x$)은 전체적으로 인장응력 성분이 나타나고 있다. 폭방향의 용접잔류응력($\sigma_y$)은 접합부 부근에서 인장응력성분이 나타나지만 모재에서는 압축응력성분을 보이고 있다. 또한, 용접선방향과 폭방향의 용접잔류응력($\sigma_x$, $\sigma_y$)이 용접부의 양단에서 최대값을 보이고 있다. 이러한 점들은 점용접에서 나타난 용접부 및 용접부 주위에서 나타나는 용접잔류응력의 분포가 Nd:YAG 레이저 용접과 비슷한 경향을 보여주고 있다.

► 최적 저항 점용접 조건을 선정한 후 용접부 길이 10, 15, 20mm에 대한 레이저 용접을 실시하여 인장시험(시험편 크기: 100(W)*30(L)*1(T)mm)을 실시한 결과 레이저 stitch 용접시 필요한 용접부의 길이를 20mm로 채택하였다.

( 단점용접 인장강도-약 242MPa, 레이저 20mm 용접 인장강도-약 340MPa)

► 레이저 stitch 용접의 간격은 다점용접(P=60mm)의 인장하중을 기준하여 레이저 stitch 용접의 간격을 60mm로 선정하였다.

(다점용접 인장강도-약 116MPa, 레이저 stitch 용접 인장강도-약 123MPa)

► Nd:YAG 레이저 Stitch 용접은 초기 설치 비용이 비싼 단점에도 불구하고, 용접속도가 빠르고, 용접성이 우수하며, 용접공정 또한 단순화 할 수

있어 생산적인 측면에서 저항점용접에 비해 매우 큰 향상을 기대할 수 있다.

► Nd:YAG 레이저 Stitch 용접의 용접 가용면적은 저항점용접에 필요한 가용면적을 50%이상 줄일 수 있어 자동차 경량화 및 연비 개선, 생산비 절감 등의 효과를 가져올 수 있다.

이러한 결론을 통해 지금 자동차 산업현장에서 적용되고 있는 저항점용접보다 Nd:YAG 레이저 Stitch 용접의 적용 비율이 훨씬 높아질 것이라 예상된다.

# 참고문헌


1. 방한서, "유한요소법에 의한 박판용접의 2 차원 비정상열전도해석", 대한조선학회지, Vol. 27, No. 4, pp.44~50, 1990
2. 방한서, 김유철, "유한요소법에 의한 후판 용접시의 3 차원 비정상 열전도 해석", 대한용접학회지, Vol. 9, No.2, pp. 37~43, 1991.
3. 방한서, "후판용접부의 역학적 특성-유한요소법에 의한 3 차원 열탄소성 해석", 대한용접학회지, Vol.10, No.4, pp. 250~258, 1992
4. 대한용접학회, "용접·접합편람", pp.92~125, pp.365~399, pp.576~613, 1998
5. ASM HANDBOOK, "Welding, Brazing and soldering", Vol. 6, pp.262~266
6. 장인성, "Nd:YAG 레이저를 이용한 차체 레이저 용접", 대한용접학회지 제 19 권 제 4 호, 2001 년 8 월
7. Young-Pyo, Kim, "A study on the weldability and thermal behavior of medium carbon steel in Nd:YAG laser welding", Chosun Uni. Master's thesis, Feb. 2002
8. 방희선, "저항다점용접부의 열 및 역학적 특성에 관한 연구", 조선대학교 박사학위 논문, 2001

9. 주성민, “수치시뮬레이션에 의한 저항 점 용접부의 열 및 역학적 거동에 관한 연구”, 조선대학교 석사학위 논문, 1997

10. 신현, “저항점용접 피치변화에 따른 용접부의 역학적 특성에 관한 연구”, 조선대학교 석사학위 논문, 2001

11. 방한서, 윤병현, 김성주, 임채환, “선체고장력강 레이저 용접부의 열분포 특성에 관한 연구”, Journal of KWS, Vol. 21, No. 3, June, 2003

12. 방한서, 윤병현, 김영표, 임채환, “선체고장력강 레이저 용접부의 잔류응력분포 특성에 관한 연구”, 대한용접학회지, 제 21 권 제 3 호, 2003 년 6 월

13. 방한서, 윤병현, “수치 시뮬레이션에 의한 레이저용접부의 용접잔류응력 특성에 관한 연구”, 대한용접학회, 학술발표대회 개요집 제 2 권, 2000. 1, pp. 118 ~ 120

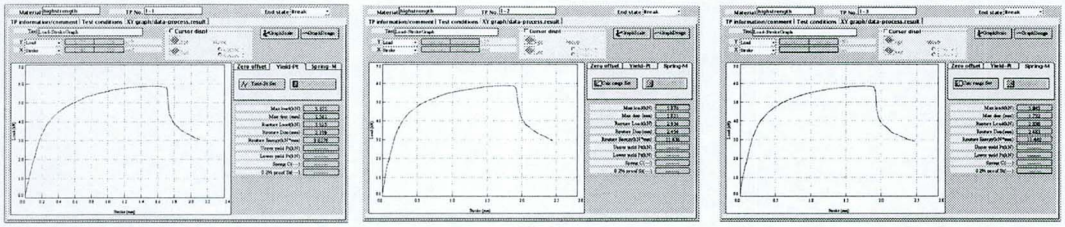
14. 방한서, 윤병현, “수치 시뮬레이션에 의한 레이저용접부의 열분포 특성에 관한 연구”, 대한용접학회, 학술발표대회 개요집 제 2 권, 2000. 1, pp. 121 ~ 123

15. D.J. Browne, H.W. Chandler, J.T. Evans and J.Wen, “computer simulation of resistance spot welding in aluminum:part1”, welding research supplement, pp.339~344, October, 1995

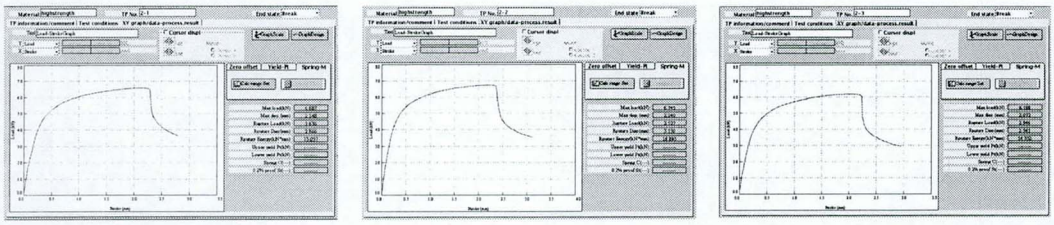
16. 김명준 저, “저항용접”, 기문사, 1995

# Appendix

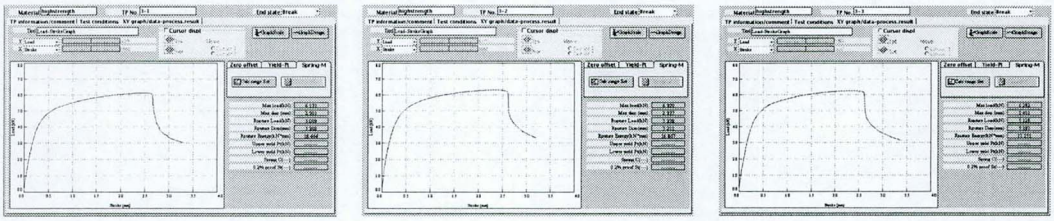
Fig 5는 각 용접변수별 단점용접, Nd:YAG Laser 용접, 피치가 60mm 인 다점용접, Nd:YAG Laser stitch 용접에 대한 인장시험 결과를 나타낸 그래프이다.



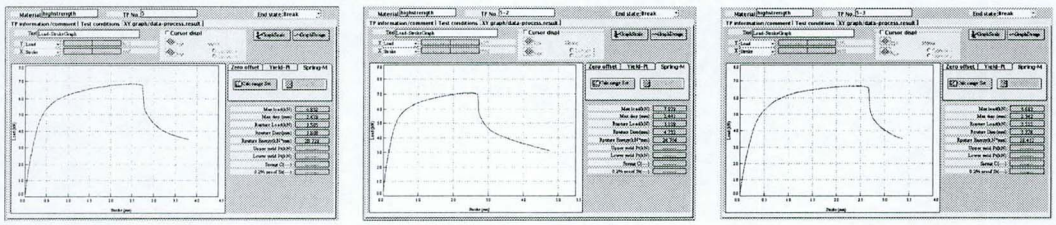
Single - spot weld : 180Kgf, 10cycle, 8KA



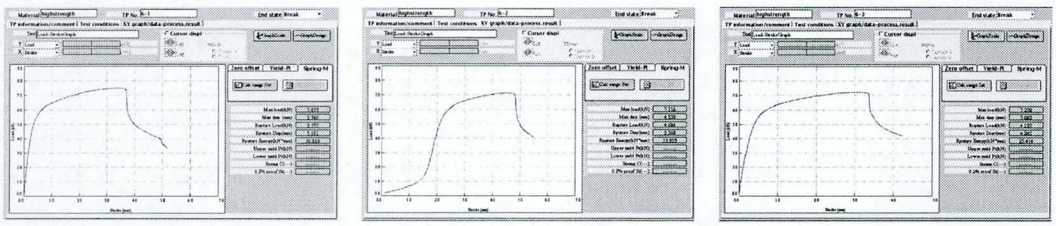
Single - spot weld : 180Kgf, 10cycle, 9KA



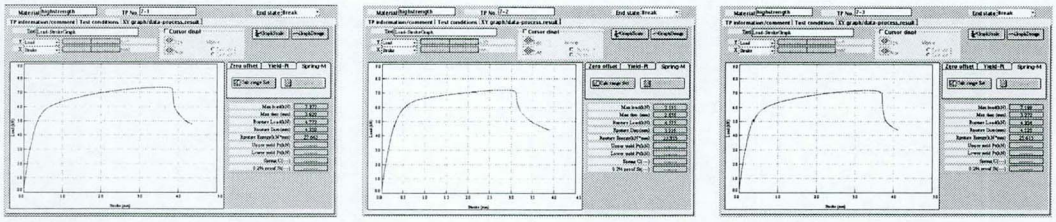
Single - spot weld : 180Kgf, 10cycle, 10KA



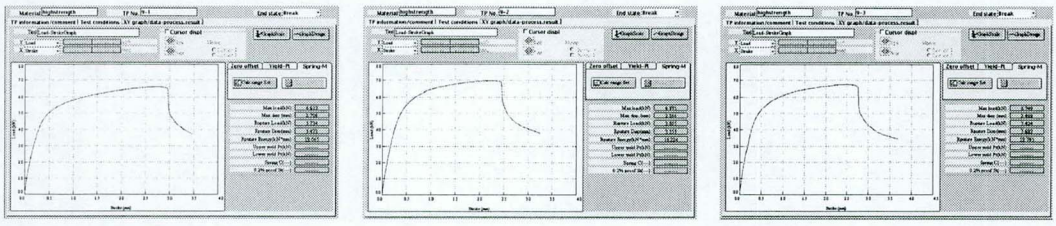
Single - spot weld : 180Kgf, 15cycle, 8KA



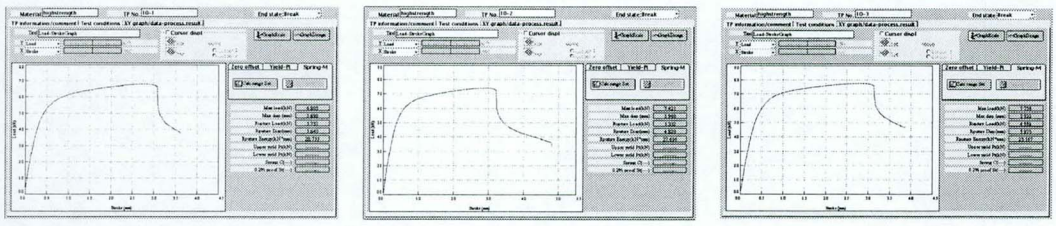
Single - spot weld : 180Kgf, 15cycle, 9KA



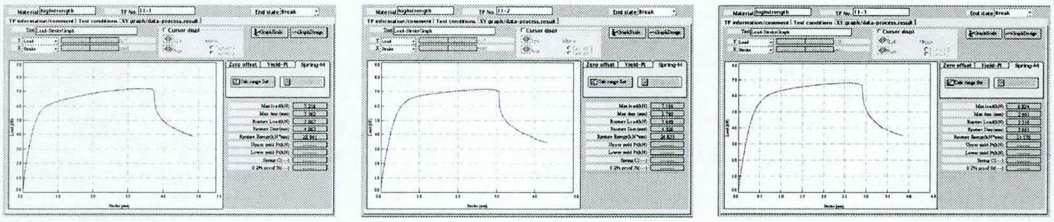
Single - spot weld : 180Kgf, 15cycle, 10KA



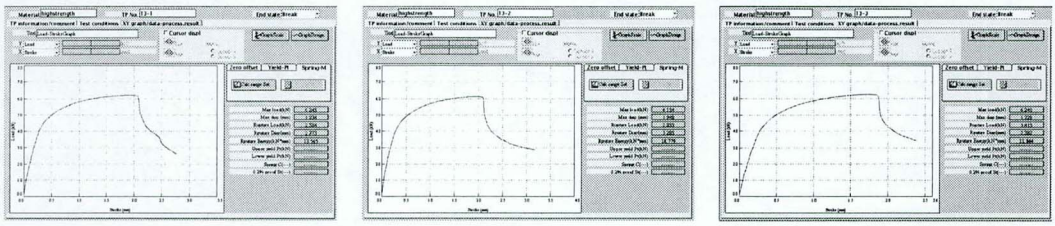
Single - spot weld : 180Kgf, 20cycle, 8KA



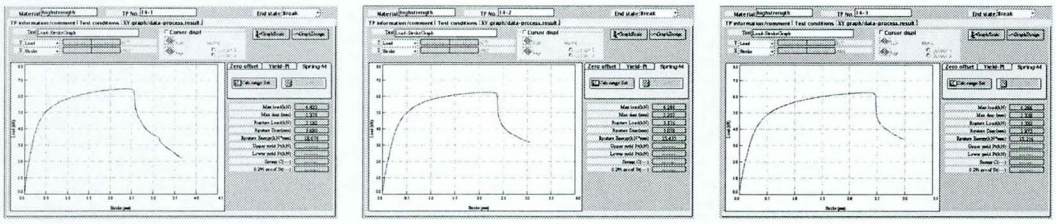
Single - spot weld : 180Kgf, 20cycle, 9KA



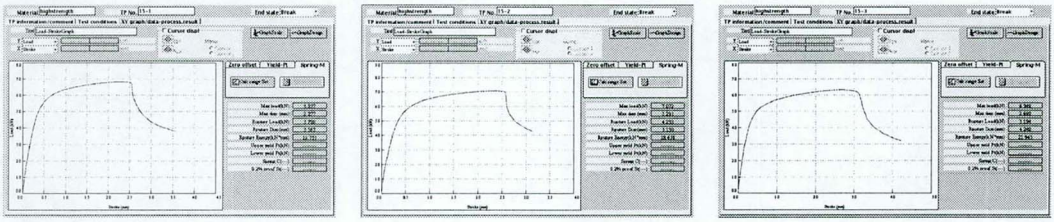
Single - spot weld : 180Kgf, 20cycle, 10KA



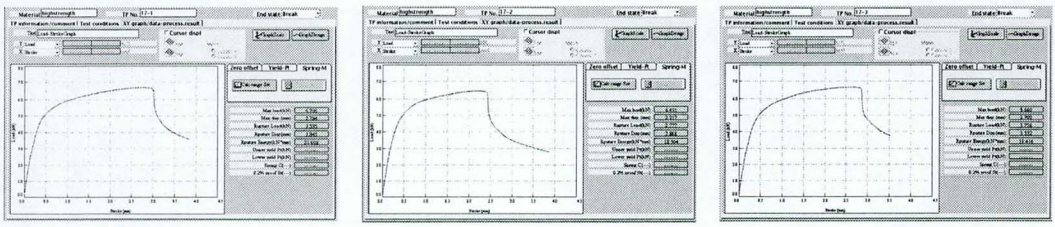
Single - spot weld : 200Kgf, 10cycle, 8KA



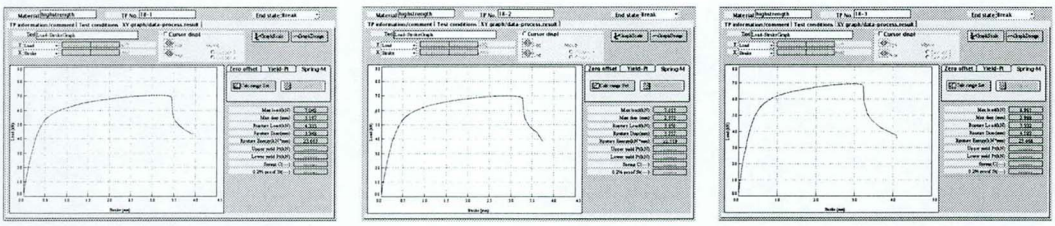
Single - spot weld : 200Kgf, 10cycle, 9KA



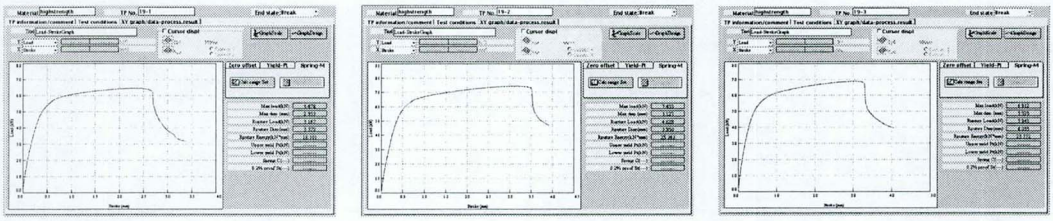
Single - spot weld : 200Kgf, 10cycle, 10KA



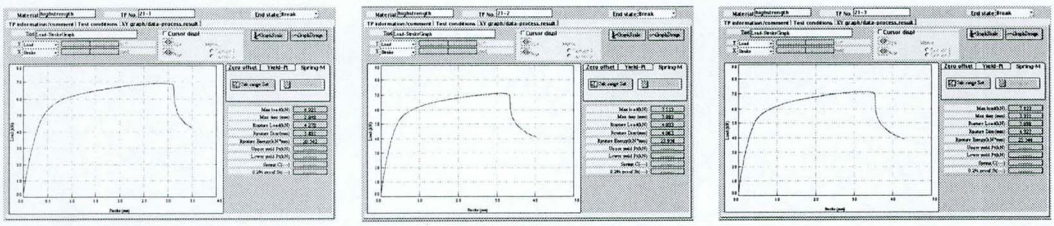
Single - spot weld : 200Kgf, 15cycle, 8KA



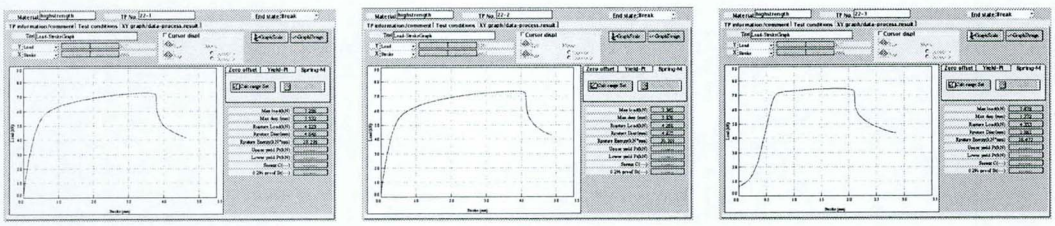
Single - spot weld : 200Kgf, 15cycle, 9KA



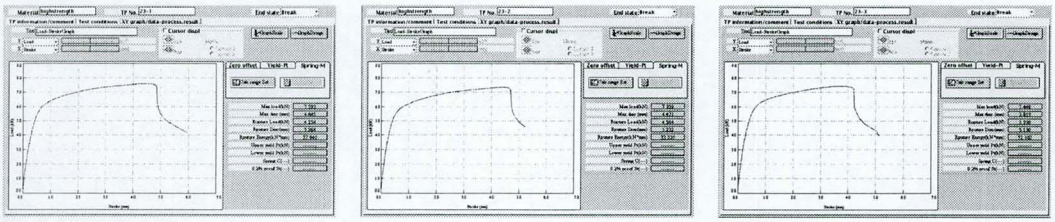
Single - spot weld : 200Kgf, 15cycle, 10KA



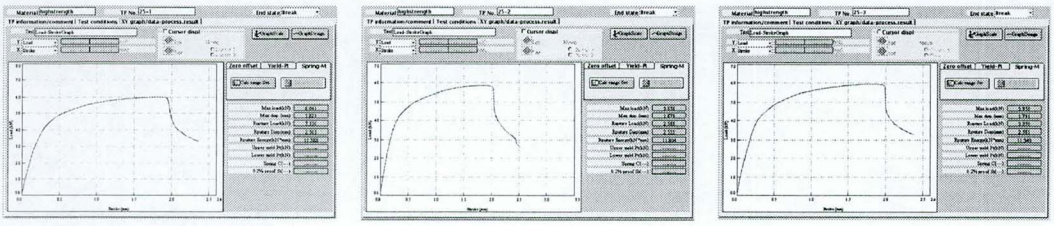
Single - spot weld : 200Kgf, 20cycle, 8KA



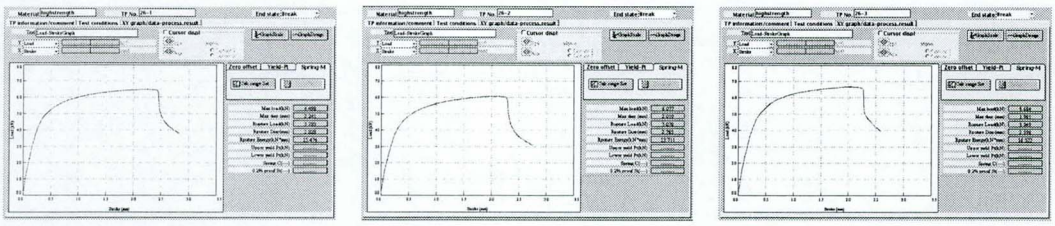
Single - spot weld : 200Kgf, 20cycle, 9KA



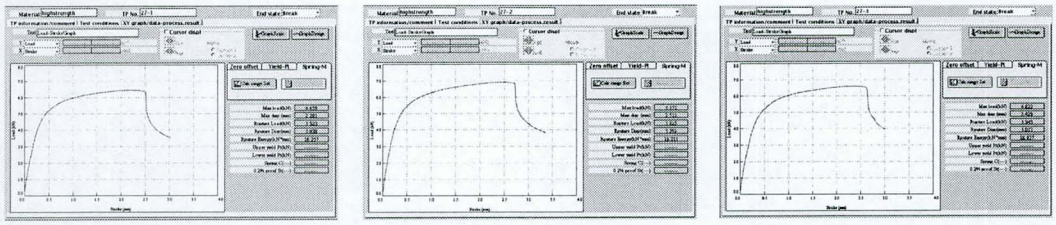
Single - spot weld : 200Kgf, 20cycle, 10KA



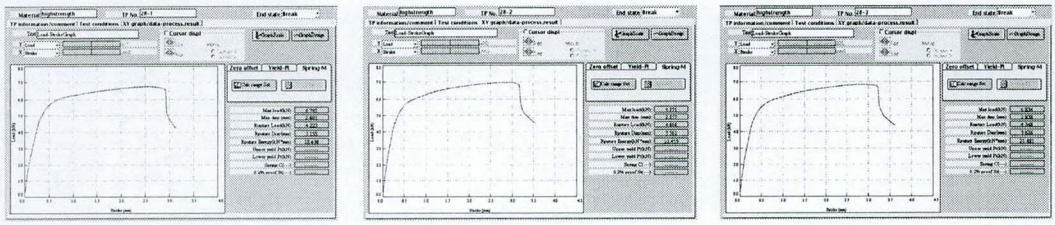
Single - spot weld : 220Kgf, 10cycle, 8KA



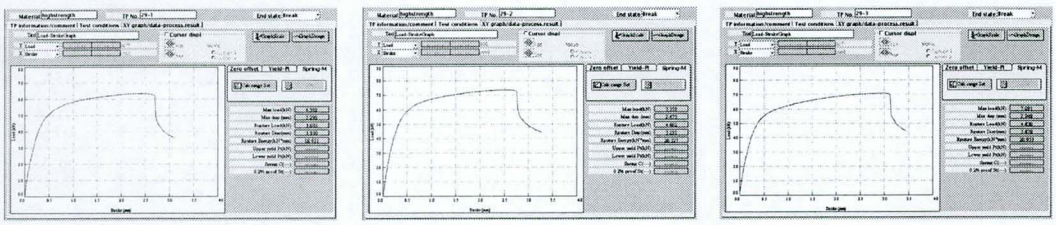
Single - spot weld : 220Kgf, 10cycle, 9KA



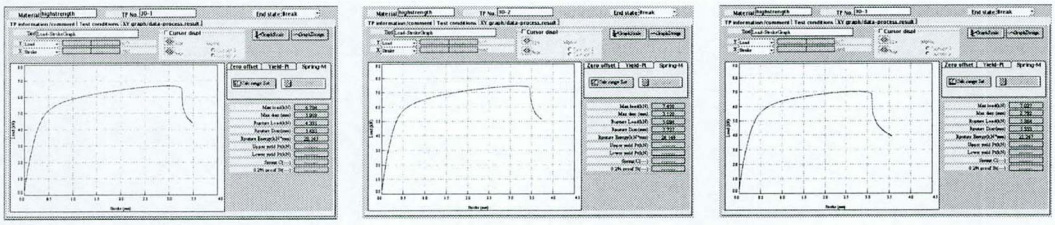
Single - spot weld : 220Kgf, 10cycle, 10KA



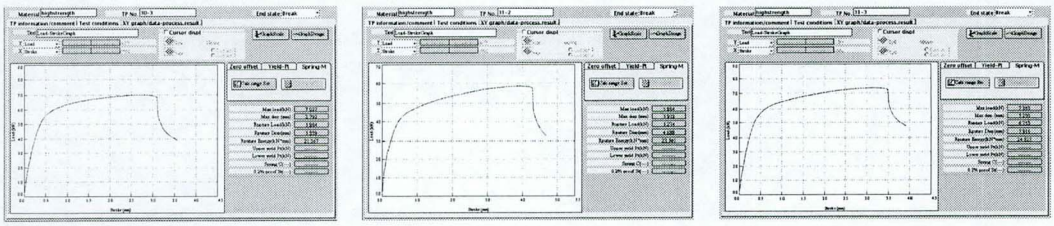
Single - spot weld : 220Kgf, 10cycle, 11KA



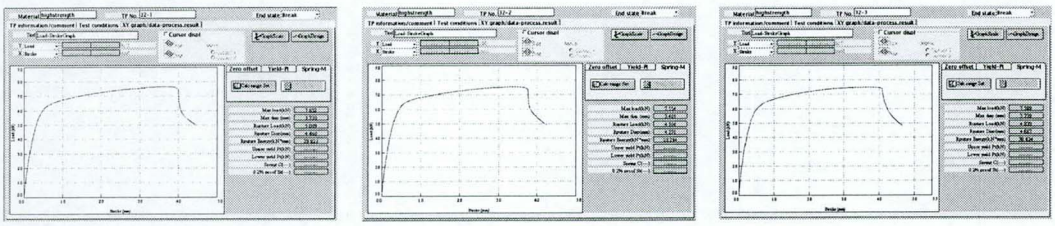
Single - spot weld : 220Kgf, 15cycle, 8KA



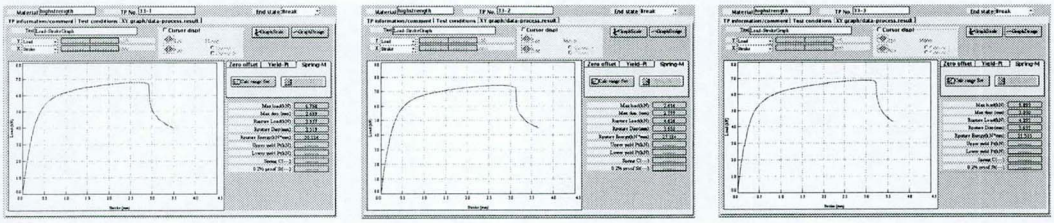
Single - spot weld : 220Kgf, 15cycle, 9KA



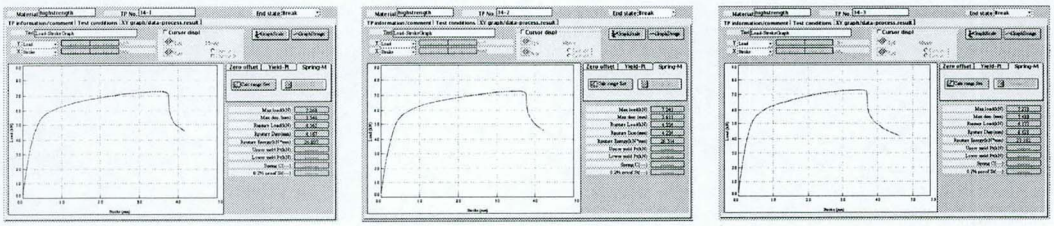
Single - spot weld : 220Kgf, 15cycle, 10KA



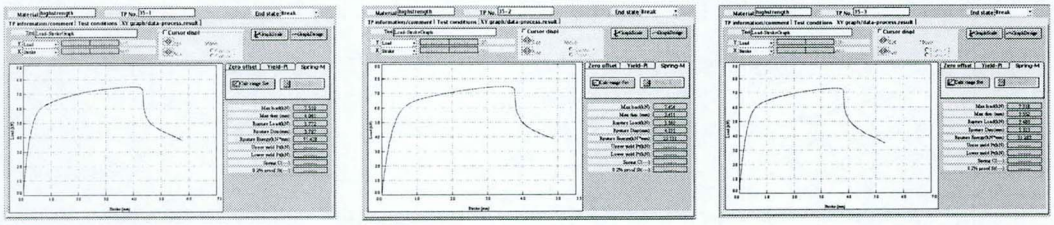
Single - spot weld : 220Kgf, 15cycle, 11KA



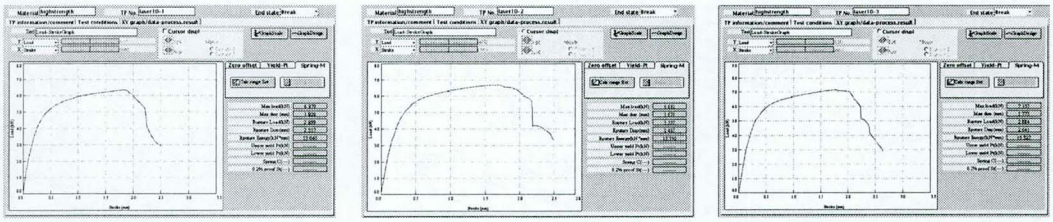
Single - spot weld : 220Kgf, 20cycle, 8KA



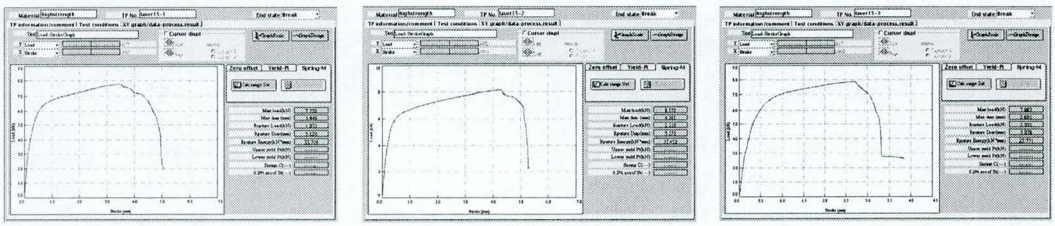
Single - spot weld : 220Kgf, 20cycle, 9KA



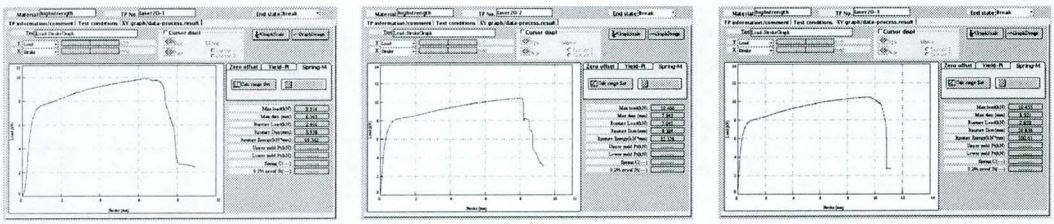
Single - spot weld : 220Kgf, 20cycle, 10KA



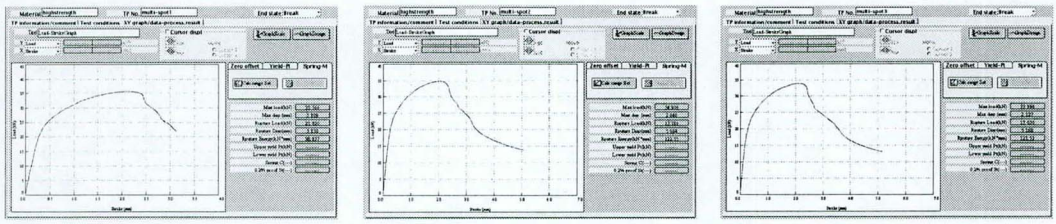
Nd:YAG laser weld : L=10mm



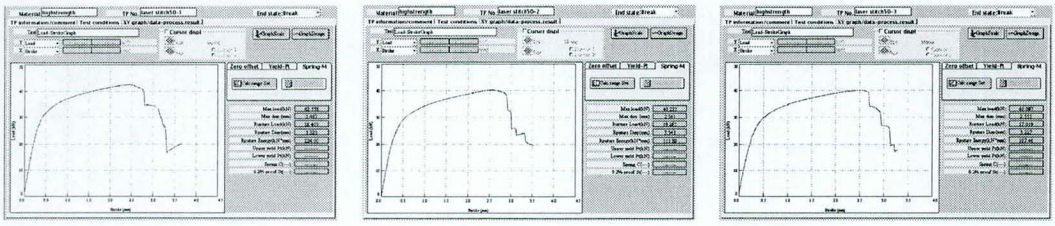
Nd:YAG laser weld : L=15mm



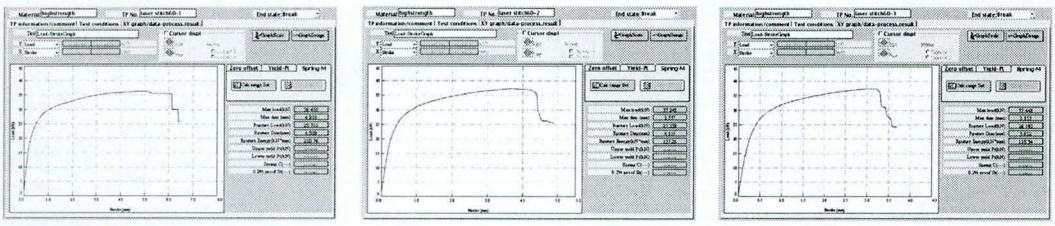
Nd:YAG laser weld : L=20mm



Multi-spot weld : P=60mm



Nd:YAG laser stitch weld : P=50mm



Nd:YAG laser stitch weld : P=60mm